



IDAs Klimasvar 2045

Sådan bliver vi klimaneutrale

Lund, Henrik; Mathiesen, Brian Vad; Thellufsen, Jakob Zinck; Sorknæs, Peter; Chang, Miguel; Kany, Mikkel Strunge; Skov, Iva Ridjan

Publication date:
2021

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Lund, H., Mathiesen, B. V., Thellufsen, J. Z., Sorknæs, P., Chang, M., Kany, M. S., & Skov, I. R. (2021). *IDAs Klimasvar 2045: Sådan bliver vi klimaneutrale*. Ingeniørforeningen IDA.

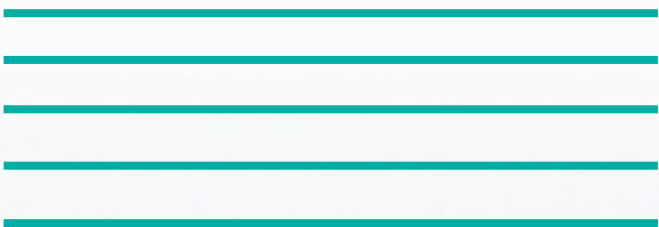
General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



IDAS Klimasvar 2045

– Sådan bliver vi klimaneutrale

Udarbejdet af forskere fra
Aalborg Universitet i dialog med
IDAS Klimaekspertgruppe



AALBORG UNIVERSITET

IDAs Klimasvar 2045 – Sådan bliver vi klimaneutrale

© Udarbejdet af forskere fra Aalborg Universitet:
Henrik Lund, Brian Vad Mathiesen
Jakob Zinck Thellufsen, Peter Sorknæs
Miguel Chang, Mikkel Strunge Kany og Iva Ridjan Skov
Institut for Planlægning, Aalborg Universitet

Udgivet juni 2021 af:
Ingeniørforeningen, IDA
Kalvebod Brygge 31-33
1560 København V

ISBN: EAN 978-87-93541-36-8

Rapportens fund og konklusioner er redaktionens ansvar.
Rapporten er bestilt af Ingeniørforeningen, IDA.

IDAs Klimasvar er et resultat af et forskningssamarbejde mellem IDA og Energiforskningsgruppen ved Institut for Planlægning ved Aalborg Universitet. IDAs Klimasvar er skrevet af rapportens forfattere, som også har lavet alle analyserne. Arbejdet bygger på de tre tidligere IDA energistrategier fra 2006, 2009 og 2015 samt IDAs klimasvar 2035.

Arbejdet er blevet fulgt af og har modtaget bidrag fra IDAs Klimaekspertgruppe:
Monika Skadborg, Per Homann Jespersen
Niels Brock, Torben Nørgaard
Felica Fock, Henrik Lund, Søren Linderøth, Peter Bach, Laura Klitgaard (tovholder fra IDAs Hovedbestyrelse) samt Pernille Hagedorn-Rasmusen, IDA (faglig sekretær)

Arbejdet har desuden fået input og kommentarer fra:
IDA Energi gennem formand Anders Dyrelund og
IDA Byg ved Kurt Emil Eriksen

Herudover ønsker forfatterne at takke følgende personer for værdifulde input undervejs:
Professor Henrik Wenzel, SDU
Seniorforsker emerita Linda Christensen, DTU
Chefkonsulent Per Henriksen, Dansk Luftfart
Seniorkonsulent Svend J. Christensen, Partnerskab for Ansvarlig Træbiomasse
Lektor Thomas Helmer Pedersen, AAU
Seniorforsker, Ulrik Birk Henriksen, DTU



Målet er et klimaneutralt Danmark

Det seneste år har vi levet i en Corona-tid, og pandemien præger stadig alle sider af vores hverdag. Vi har som samfund bevist, at vi kan håndtere store forandringer, når verden kræver det, og den omstillingsparathed mener jeg, vi skal tage med videre til at løse andre samfundsmæssige udfordringer. Øverst på listen står klimaet. De seneste par år har det politiske fokus været på klimalovens første mål om 70 pct. reduktion af drivhusgasudledninger i 2030. Der er stadig et stykke vej, før vi er i mål. Men 2030 er kun 9 år væk, og derfor må vi samtidig arbejde på klimalovens andet mål om et klimaneutralt Danmark. Derfor har IDA i samarbejde med Forskningsgruppen for Energiplanlægning ved Institut for Planlægning ved Aalborg Universitet udregnet et scenarie for klimaneutralitet i Danmark.

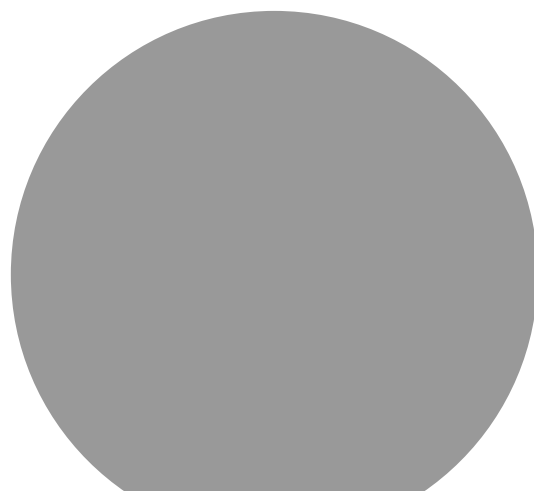
De danske politikere har i klimaloven sat klimaneutralitet som mål i 2050. Men hvis verden skal nå Parisaftalens mål om at begrænse global opvarmning til et godt stykke under 2 grader, er år 2050 desværre for sent. Derfor har vi i IDA undersøgt, hvordan vi kan blive klimaneutrale tidligere, og i denne rapport kommer vi med et gennemregnet bud på dansk klimaneutralitet i 2045. I rapporten har vi fokus på energi- og transportområdet og forudsætter, at landbruget leverer de reduktioner, der blev fremlagt af Klimapartnerskabet for Fødevarer- og Landbrugssektoren i foråret 2020.

IDA vil gerne bidrage til, at vi sammen når FNs verdensmål for bæredygtig udvikling. Vi ønsker derfor at sætte vores medlemmers viden om teknologi, produktion og infrastruktur i spil, når Danmark skal beslutte sig for klimaløsninger. Klimasvaret 2045 bygger på mere end 15 års arbejde fra IDA og IDAs medlemmer med at regne på energi- og klimascenarier for Danmark. Senest – i maj 2020 – fremlagde vi en samlet plan for 70 pct. drivhusgasreduktion i 2030. Vi bygger nu videre på 2030-målsætningerne og bidrager med fagligt funderede løsninger, der viser, hvordan Danmark kan blive klimaneutral i 2045, og hvor der også tages hensyn til den danske andel af den internationale skibs- og flytransport. Vi vil vise, hvordan løsninger som CO₂-sinks og CCS kan bidrage til at få drivhusgasudledningen ned i sektorer som landbruget og i industrien, som er udfordrede, når det kommer til at nedbringe udledningerne.

IDAs Klimasvar har øjne for en retfærdig grøn omstilling, der inddrager positive forandringer for klimaet, dansk beskæftigelse og eksport. IDA har sammen med Arbejderbevægelsens Erhvervsråd regnet på beskæftigelseseffekterne af Klimasvaret 2030. Det vil skabe 415.000 job fordelt over 10 år svarende til 41.500 job om året, og dermed bidrager den grønne omstilling markant til beskæftigelsen. Danmark skal som foregangsland vise, hvordan velfærd og grøn omstilling kan gå hånd i hånd og udnytte vores styrkepositioner indenfor teknologiudvikling og komme med løsninger til gavn for hele verdens grønne omstilling.

Mange har bidraget til arbejdet - tak for det. Jeg vil særligt sige tak til IDAs klimaekspertgruppe, IDA Energi, IDA Byg, transportarbejdsgruppen, IDAs erhvervs- og vækstudvalg, IDAs forsknings- og uddannelsesudvalg og til AAU. Målet med IDAs Klimasvar 2045 er at skabe debat og overblik over en langsigtet grøn omstilling af Danmark. Vi ønsker, at debatten og arbejdet med klimateknologier og -løsninger fortsætter, så vi kan nå i mål med den grønne omstilling. Vi vil i IDA gøre vores for at understøtte indsatsen.

Thomas Damkjær Petersen
Formand for IDA



Indhold

Indledning	6
Resumé og resultater.....	6
1 Baggrund og overordnede principper	16
2 Metode	17
2.1 Modellering af Danmark 2020 – ENS2020	18
2.2 Modellering af IDAs Klimasvar 2030	18
2.3 Modellering af 100 pct. VE og klimaneutralitet i 2045	19
2.4 Opgørelse af de samfundsøkonomiske omkostninger	20
2.5 CO ₂ -emission fordelt på forbrugssektorer	20
3 CO₂-reduktioner og opgørelser nu og i fremtiden	21
3.1 IPCC's regler for beregning af CO ₂ -emissioner	21
3.2 CO ₂ -emissioner fra biomasse	22
3.3 Den danske andel af den internationale transport.....	23
4 IDAs forslag opdelt på fire forbrugssektorer og fem tværgående temaer	25
Oversigt over IDAs Klimasvar	26
5 Varme	28
5.1 Energieffektivitet og varme.....	28
5.2 Sektorintegration og varme	28
5.3 Biomasse og varme	29
5.4 Vedvarende energi og varme	29
5.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af varmesektoren	31
5.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af varmesektoren	31
5.7 Samfundsøkonomi og varme	33
6 Industri	36
6.1 Energieffektivitet og industri	37
6.2 Sektorintegration og industri.....	37
6.3 Biomasse og industri.....	39
6.4 Vedvarende energi og industri.....	39
6.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af industrisektoren.....	40
6.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af industrisektoren	40
6.7 Samfundsøkonomi og industri	41
7 Transport	44
7.1 Energieffektivitet og transport.....	44
7.2 Sektorintegration og transport.....	45
7.3 Biomasse og transport	48
7.4 Vedvarende energi og transport	48
7.5 Teknologiske udfordringer i omstilling af transportsektoren.....	48
7.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af transportsektoren.....	49
7.7 Samfundsøkonomi og transport	50
8 El.....	53
8.1 Energieffektivitet og el.....	53
8.2 Sektorintegration og el	53

8.3 Biomasse og el.....	54
8.4 Vedvarende energi og el.....	55
8.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af elsektoren	57
8.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af elsektoren	57
8.7 Samfundsøkonomi og el.....	58
9 Energieffektivitet.....	60
10 Sektorintegration.....	61
11 Biomasse.....	64
11.1 Bæredygtige biomasse ressourcer	66
11.2 En robust flerstrengt konverteringsteknologipakke med synergi	68
11.2.1 Biogasanlæg	68
11.2.2 Termisk forgasning	68
11.2.3 Opgraderingsanlæg (Metan og Metanol)	68
11.2.4 Pyrolyse	69
11.2.5 HTL (HydroThermal liquefaction)	69
11.2.6 Afbrænding.....	70
11.2.7 CC, CCU og CCS (Carbon Capture, Utilization and Storage)	70
11.3 Biomasse i IDAs Klimasvar 2045.....	71
12 Vedvarende energi	74
13 Teknologiske udfordringer	75
Appendiks A: Forudsætninger for Økonomiberegning.....	77
Appendiks B: International fly- og skibstrafik	80
International skibstransport	81
Referencer	83

Indledning

IDAs Klimasvar er IDAs bud på, hvordan Danmark når sit mål om 70 pct. reduktion af klimagasser i 2030 og bliver klimaneutral i 2045. IDAs Klimasvar er publiceret i to omgange. I første omgang (maj 2020) var der fokus primært på 2030. I denne nye udgave (juni 2021) er der også fokus på 2045. Det er ikke første gang, vi har arbejdet med løsninger på klima- og energiområdet. IDA har i IDAs Energiplan fra 2006, IDAs Klimaplan fra 2009 og i IDAs Energivision 2050 fra 2015 lavet scenarier for det danske energisystem. Igennem scenarier har IDA undersøgt, hvilke udviklingsveje mod 100 pct. vedvarende energi og reduktion af CO₂-udledninger, der gav billigst energi, mest stabilitet, højest forsyningssikkerhed og samtidig sikrede job og beskæftigelse i Danmark. Her i IDAs Klimasvar bygges der videre på de samme tanker. Vi kommer med et konkret bud på hvordan Danmark kan reducere sine udledninger med 70 pct. i 2030 og opnå klimaneutralitet i 2045.

Igennem arbejdet de sidste 15 år er der fremkommet en række tværgående anbefalinger for, hvad der er vigtigt for ændringer og udvikling af energisystemet i Danmark. De har ikke relation til enkelte tiltag, men går på tværs og er centrale for, at Danmark kan komme videre med en omfattende omlægning mod 100 pct. vedvarende energi og klimaneutralitet. De tværgående konklusioner og anbefalinger er:

1. Danmark har brug for en langsigtet vision og en aktiv energiplanlægning. Energiplanlægningen skal både ske nationalt i energi- og klimaplaner og lokalt/regionalt i relation til den kommunale planproces.
2. Forskning, udvikling og demonstration indenfor energi- og transportløsninger er nødvendigt for, at Danmark kan nå sine klimamål.
3. Danmark har brug for en revision af afgifts- og tarifystemerne inden for transport og energi, så afgifter og tariffer bidrager til – og ikke modarbejder – den grønne omstilling.

Arbejdet med Klimasvaret bygger på denne erkendelse og må anses som en forudsætning for, at Danmark kommer bedst muligt igennem en grøn omlægning af samfundet.

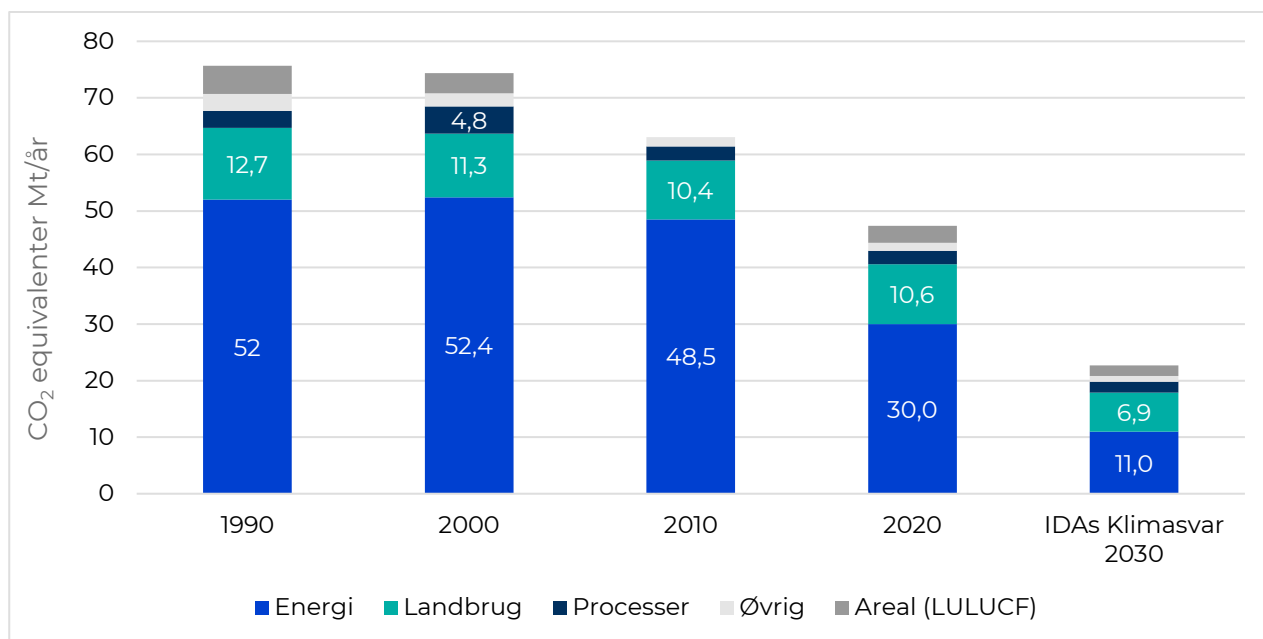
Resumé og resultater

I IDAs Klimasvar gives et konkret bud på, hvordan Danmark rent teknisk kan opfylde målsætningen om 70 pct. CO₂-reduktion i 2030 på en samfundsøkonomisk god måde. IDAs Klimasvar prioriterer, at Danmark bruger den grønne omstilling til at skabe industriel udvikling og jobs. Derudover sætter IDAs Klimasvar fokus på, hvordan vi teknisk forbereder os på tiden efter 2030. IDAs mål er, at Danmark overgår til 100 pct. vedvarende energi og bliver klimaneutral i 2045.

Reduktionsmålsætningen på 70 pct. regnes ift. Danmarks udledninger i 1990, efter FNs opgørelser. IDAs Klimasvar omfatter energi og transport (vist med mørkeblå nederst i søjlerne i figur 1). Ud over energisektoren omfatter FNs opgørelser også landbrug, industrielle processer, arealanvendelse samt øvrigt, dvs. de ikke energirelaterede emissioner.

Opgjort på denne måde var de danske emissioner på 75,7 Mt i 1990 og med en 70 pct. reduktion skal de altså nedbringes til 22,7 Mt i 2030. IDA forudsætter, at der også i de andre sektorer sker reduktioner frem til 2030. Konkret forudsættes det, at de andre sektorer reducerer fra en (forventet) emission på 17 Mt i 2020 til 11,7 Mt i 2030.

Figur 1. Dansk CO₂-emission iflg. FN-opgørelsesmetoden



Kilde: Energistatistik 2018.

Note: Tallene er justeret for LULUCF og tilpasset 75,7 i 1990. *Øvrig omfatter "andre emissioner" og "indirekte emissioner". 2020 er delvist baseret på historiske tal for 2017 samt fremskrivning til 2020. IDAs Klimasvar omfatter energi og transport - den nederste blå.

Første skridt er således et mål om at emissionerne for energi og transport skal reduceres fra 30 Mt i 2020 til ca. **11 Mt i 2030**. Næste skridt er et bud på, hvordan Danmark kan opnå **CO₂-neutralitet i år 2045**. I IDAs forslag for 2045 tages der i modsætning til 2030 hensyn til den danske andel af den internationale skibs- og flytransport. Når disse bidrag medregnes, er den reelle CO₂-emission højere i såvel 2020 som i 2030. For 2020 stiger opgørelsen fra 47 til 61 Mt/år og for 2030 fra knap 23 til knap 29 Mt/år. IDAs Klimasvar 2045 er således et bud på, hvordan der opnås klimaneutralitet, også hvad angår den danske andel af den internationale skibs- og flytransport.

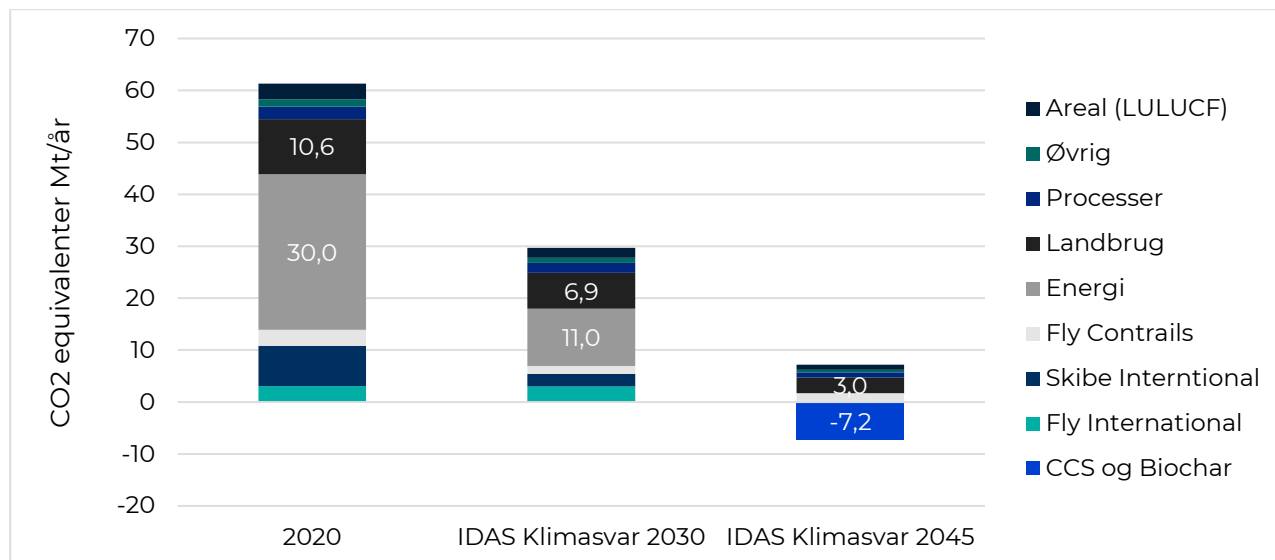
Det kan blive nødvendigt i de øvrige sektorer før og/eller efter 2030 at gøre brug af CCS (opsamling af CO₂ og lagring) for at blive helt CO₂-neutrale. For at det kan være muligt for de andre sektorer at benytte CCS-teknologien satser IDAs Klimasvar udelukkende på CCU (opsamling af CO₂ og anvendelse) i energi- og transportsektoren, hvor den indsamlede CO₂ bruges (CCU) til produktion af VE brændsler til især flytransport og tung transport.

IDAs forslag for 2045 omfatter udvikling og anvendelse af bæredygtige biomasse-ressourcer på en måde, hvor der tilvejebringes et potentiale for CO₂-sink i form af biochar og et potentiale for CCS. I alt er der tale om et sink på ca. 5 Mt/år afhængigt af udnyttelsesgraden uden brug af "air-capture", som en sidste – men meget dyr – mulighed. Dette potentiale vil kunne kompensere for nogle af de andre sektorer, f.eks. landbrug og proces i industrien, som det kan være vanskeligt at bringe helt til CO₂-neutralitet uden sink.

Ud af de ca. 5 Mt/år skal der bruges 1-2 Mt/år til at kompensere for de contrails som er konsekvensen af flyvning. Om de resterende 3-4 Mt/år er nok til at opnå klimaneutralitet afhænger af, hvad der sker i de andre sektorer. I figur 2 er vist et eksempel, hvor der inkl. compensation for contrails skal kompenseres i alt 7 Mt/år. I dette eksempel er landbruget reduceret til 3 Mt/år,

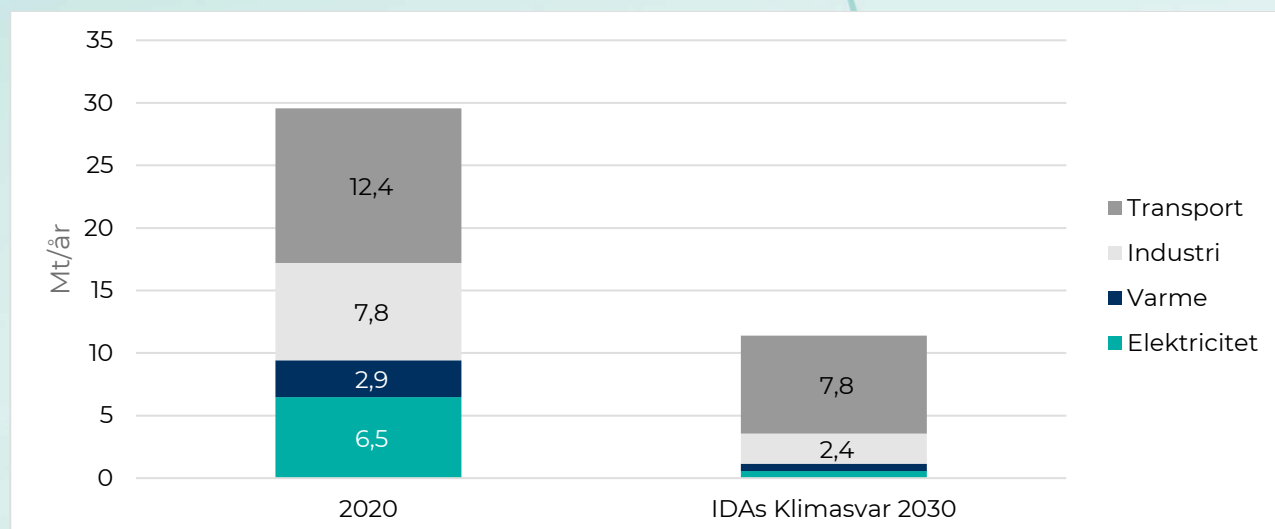
industrielle processer til 1 Mt/år og LULUCF og øvrigt til 1,5 Mt/år. I dette eksempel vil det altså være nødvendigt at supplere med air-capture i størrelsesordenen ca. 2 Mt/år.

Figur 2. Dansk CO₂-neutralitet i 2045. Dansk CO₂ emission iflg. FN-opgørelsesmetoden



IDAs Klimasvar opdeler energi- og transportområdet i fire forbrugssektorer: Varme, Industri, Transport og El. Resultatet af IDAs Klimasvar er vist i figur 3. Som det ses har transportsektoren i 2020 den største andel af CO₂-emissionen, og det er forsat gældende i 2030, også i IDAs Klimasvar. Det er derfor helt afgørende, at vi allerede nu forbereder Danmark på, hvordan sektoren kan reducere yderligere i årene efter 2030.

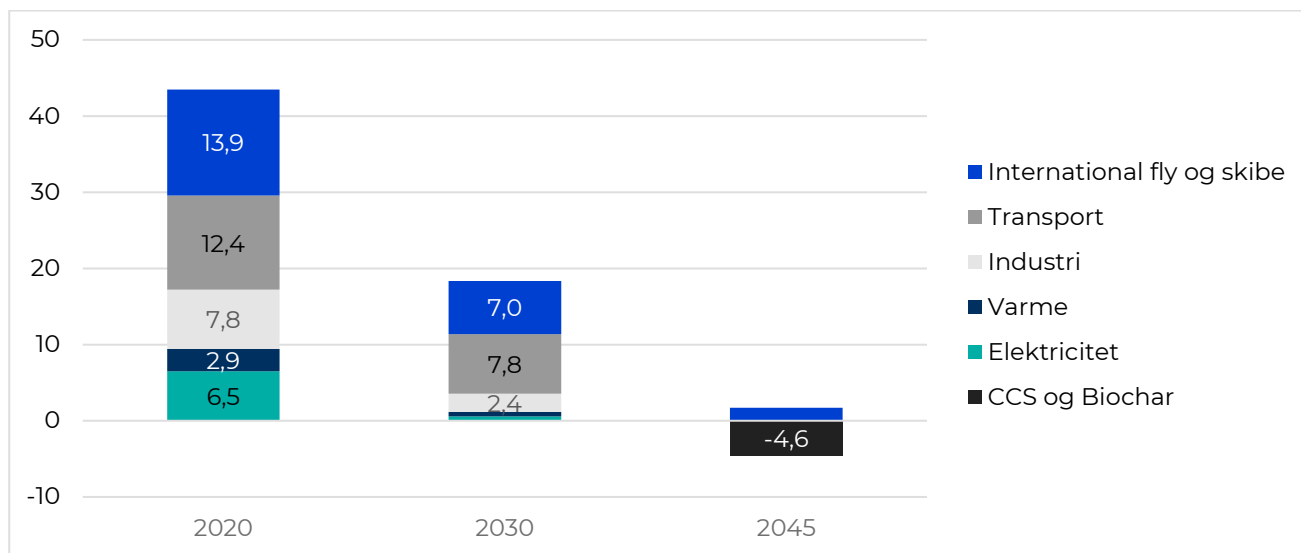
Figur 3. Fordeling af CO₂-emissionen på sektorer. CO₂-emission. FN-opgørelsesmetoden



I figur 3 er CO₂-emission opgjort efter FN-metoden. Indregnes bidraget fra internationale fly- og skibstransport bliver tallene større som vist i figur 4. Her er det vist, hvordan IDAs Klimasvar 2045

bringer CO₂-emissionen ned på nul fra energisektoren bortset fra bidraget fra fly contrails. Dette kompenseres dog af potentialet for biochar og CCS.

Figur 4. Fordeling af CO₂-emissionen på sektorer inkl. andel fra internationale fly og skibstransport (Mt/år)



IDAs klimasvar kræver investeringer for ca. 5-600 milliarder kroner i de næste 10 år frem til 2030 og yderligere ca. 600 milliarder kroner i perioden fra 2030 til 2045. De vigtigste investeringer er oplyst i tabel 1.

Sammenlignet med referencerne betyder det, at den samfundsøkonomiske omkostning til renter og afskrivninger øges med ca. 32 milliarder kr. pr. år i 2030 og med ca. 33 milliarder kr. pr. år i 2045. Til gengæld spares der brændsel for ca. det samme beløb i begge scenarier.

Omlægningen i omkostninger er vist i figur 5. Som det ses erstattes udgifter til brændsel med udgifter til investeringer. Ift. 2020 stiger den samlede omkostning en smule, men det skyldes, at energibehovene også forventes at stige frem til 2030. Sammenlignet med en sådan reference 2030 situation stiger den samlede omkostning i IDAs Klimasvar 2030 ikke, hvis brændselspriserne udvikler sig iht. Energistyrelsens seneste forventninger. Denne sammenligning er dog meget afhængig af, hvilke brændselspriser der forudsættes. Konklusionen er derfor, at hvis omstillingen teknisk set gennemføres på den rigtige måde, er den uden nævneværdige samfundsøkonomiske omkostninger. Det vil dog have store fiskale konsekvenser, hvorfor en afgifts- og skatteomlægning er nødvendig.

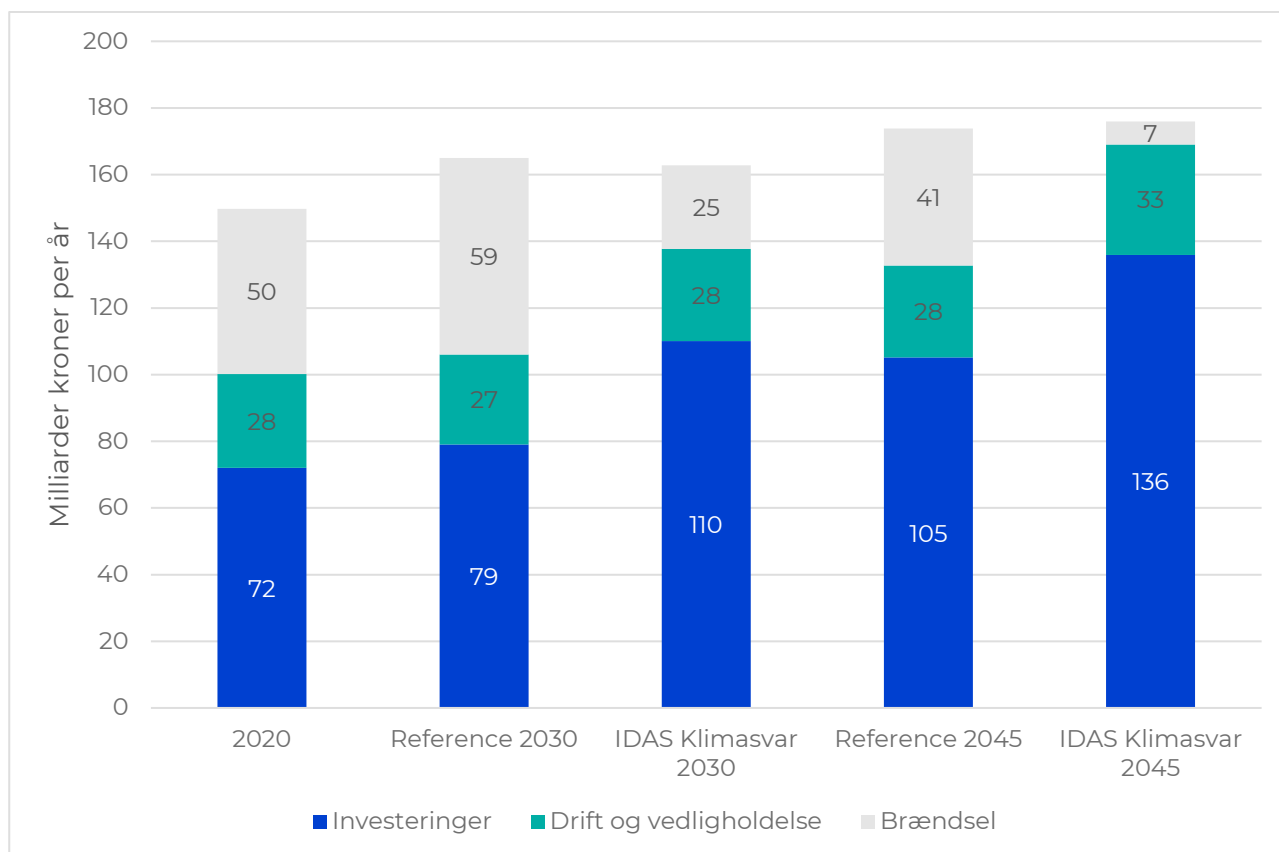
Billedet er det samme for ændringerne efter 2030 frem til 2045. Brændselsomkostningerne reduceres til gengæld for øgede investeringsomkostninger, men den samlede omkostning ændres ikke markant. Igen er den sidste konklusion afhængig af forventningen til de fremtidige omkostninger til fossile brændsler i en reference. I figur 5 er omkostningerne i 2045 udregnet under samme forudsætninger som frem til 2030 (Se appendiks A).

Tabel 1. De største investeringer i perioden 2020 til 2030 og fra 2030 til 2045

	Fra 2020 til 2030		Fra 2030 til 2045	
	Investerings- behov	Årlige af- skrivning og rente i 2030	Investe- rings-behov	Årlige afskriv- ning og rente i 2045
	<i>Milliarder DKK</i>	<i>Millioner DKK/år</i>	<i>Milliarder DKK</i>	<i>Millioner DKK/år</i>
Bygningsrenovering	124	5.360	185	7.986
Offshore og onshore vindmøller	78	4.173	102	5.150
El-køretøjer (ekstra inkl. e-roads)	73	6.896	52	4.947
Individuelle varmepumper	70	5.114	7	946
Industri (besparelser og elektrificering)	36	2.570	28	2.079
Fjernvarmeudvidelse og 4G fjernvarme	30	1.467	7	462
Solceller	21	937	22	969
Biogasanlæg	18	1.223	12	857
Nye gasfyrede værker	16	897	1	18
Ladestandere, elnet og ITS	14	825	25	1.463
Store varmepumper	9	499	28	1.594
Elektrolyse og brintlager	8	501	78	3.531
Geotermi	8	440	8	410
Bølgekraft	5	303	5	303
Forgasning, pyrolyse og elektrofuels	5	316	25	1.579
Intelligent fleksibelt elbehov	3	235	1	93
Solvarme, overskudsvarme og varmelagre	3	176	2	97
Fjernkøling	2	89	0	0
Gasnet 2030 hhv. brintnet 2045	2	89	10	390
Sum	525	32.110	598	32.874

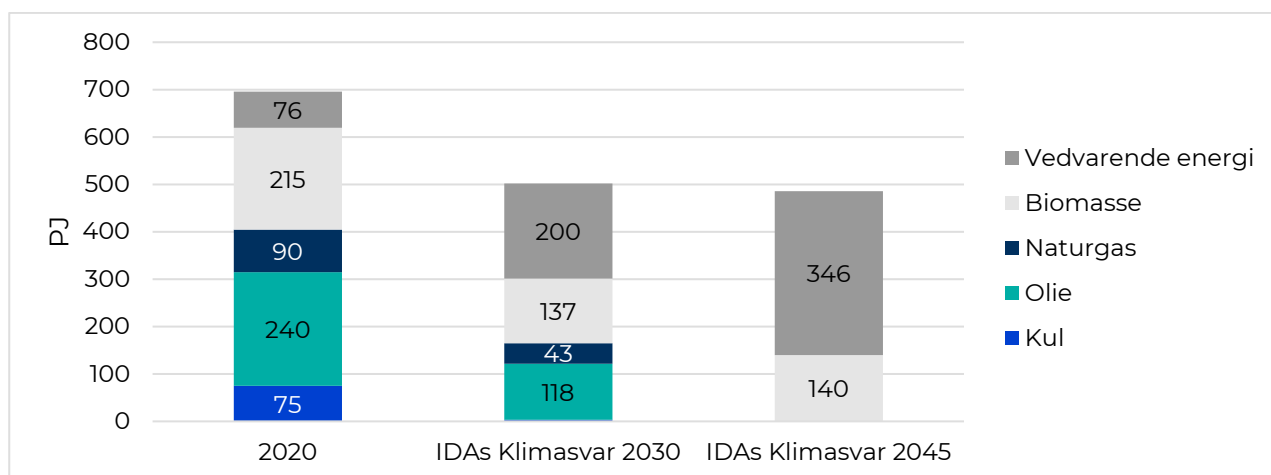
I figur 5 er IDAs Klimasvar 2045 sammenlignet med en reference defineret med udgangspunkt i forslaget for 2030. Behovene for varme, el, industri og transport er fremskrevet på samme måde i referencen som i IDAs Klimasvar 2045-scenariet, men der er ikke investeret i alle de mange tiltag. Dog er der i referencen investeret i ekstra kraftværkskapacitet for at kunne dække stigningen i elforbruget.

Figur 5. Samfundsøkonomiske omkostninger 2020, 2030 og 2045



Note: Når tallene ikke stemmer 100% med tabel 1 skyldes det, at tabel 1 kun medtager de væsentligste investeringer.

Figur 6. Brændsler og vedvarende energi i IDAs Klimamasvar 2045 sammenlignet med 2020 og IDAs Klimamasvar 2030



Med IDAs Klimamasvar nedbringes forbruget af fossile brændsler gennem effektiviseringer og udbygning med vedvarende energi (se figur 6). Samtidigt nedbringes også afbrændingen af biomasse. Målt per capita bringes biomasseforbruget ned fra ca. 29 GJ/capita i 2020 til ca. 24 GJ/capita 2030. Desuden omlægges der fra importerede træpiller til biogas, halm, træpiller og flis,

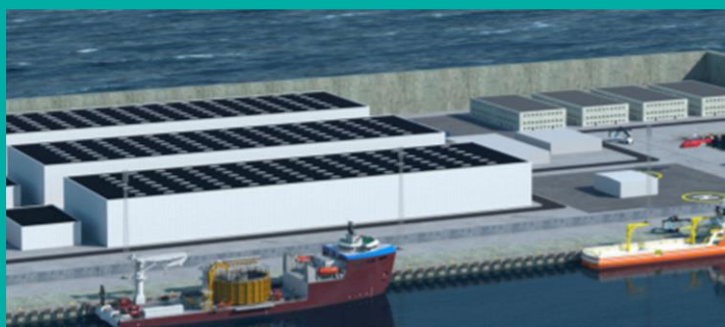
primært baseret på danske ressourcer. I 2045 er energiforsyningen helt baseret på biomasse og anden vedvarende energi. Netto biomasseforbruget holdes forsat på ca. 23 GJ/capita.

Med hensyn til **energieffektivitet** vil Danmark med IDAs Klimasvar kunne opfylde sine forpligtelser iht. EU's energieffektiviseringsdirektiv.

Med hensyn til **sektorintegration** sikrer IDAs Klimasvar en omkostningseffektiv brug af forskellige lagermuligheder fleksibilitet og indregulering, så ubalancer i elforsyningen nedbringes til et minimum.

I figur 7 på de følgende sider er illustreret, hvordan energi-flowet omlægges i sankey-diagram.

FLERE ENERGIØER PÅ VEJ



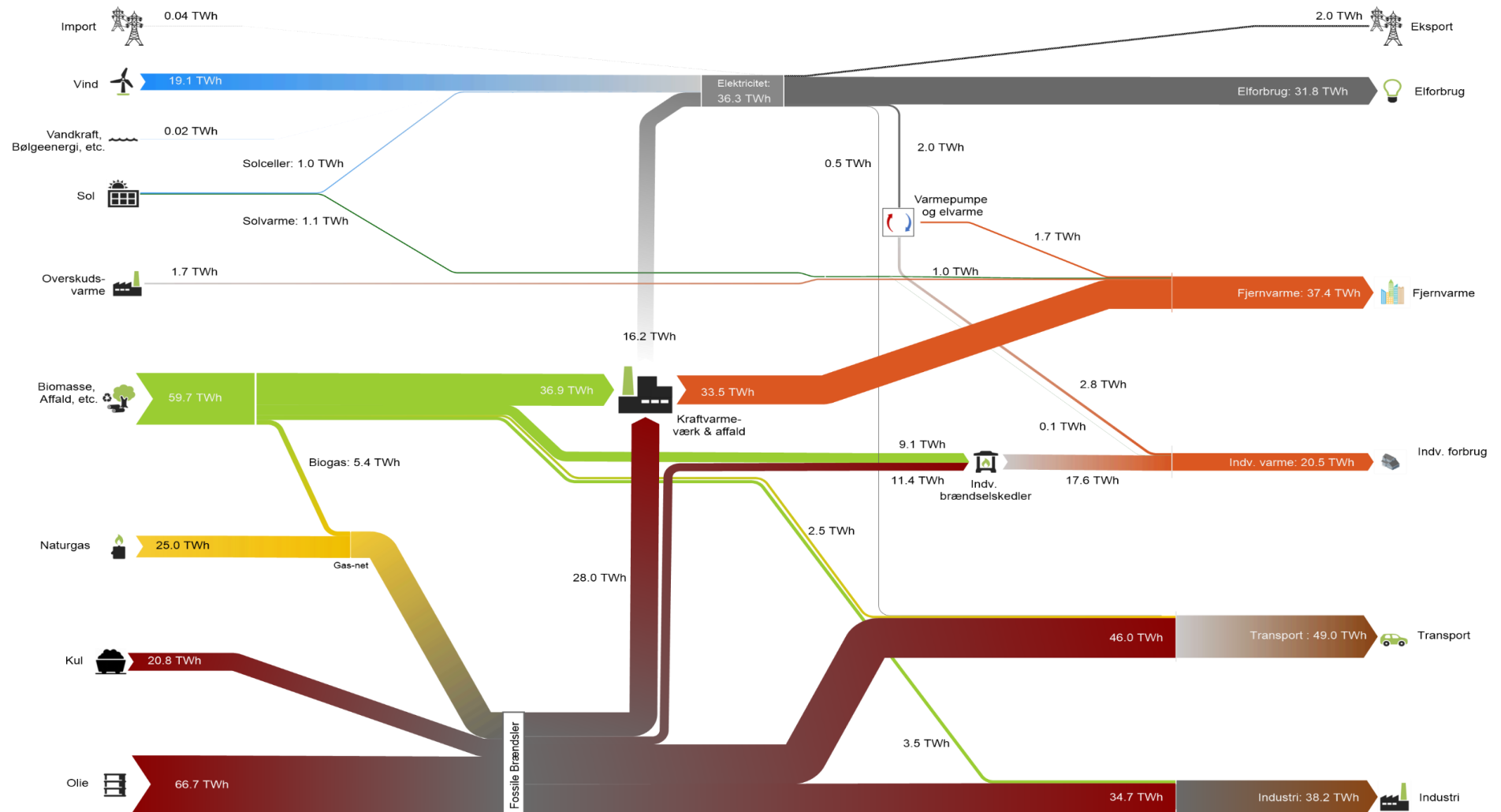
I februar 2021 indgik et bredt flertal på Christiansborg en aftale om, at Danmark skal have en energiø i Nordsøen. Den kommende energiø skal konstrueres som en inddæmmet ø og etableres og ejes i et offentligt/privat samarbejde. I første fase skal der opføres minimum 3 GW havvind i forbindelse med øen og på sigt skal øen kunne håndtere 10 GW. Aftalekredsen fastholder også planen om en energiø ved Bornholm inkl. 5 GW havvind. Af aftalen fremgår desuden, at energiøerne skal være en del af power-to-x produktion i Danmark.

IDAs Klimasvar indebærer en udbygning med havvind fra de nuværende ca. 2 GW op til 6-7 GW i 2030 og ca. 14 GW i 2045. Hertil kommer en markant satsning på Power-to-x. IDAs Klimasvar medregner omkostninger til vindmøller og power-to-x anlæg inkl. ilandføring af strømmen, men har ikke indregnet evt. yderligere omkostninger til selve energiøerne.

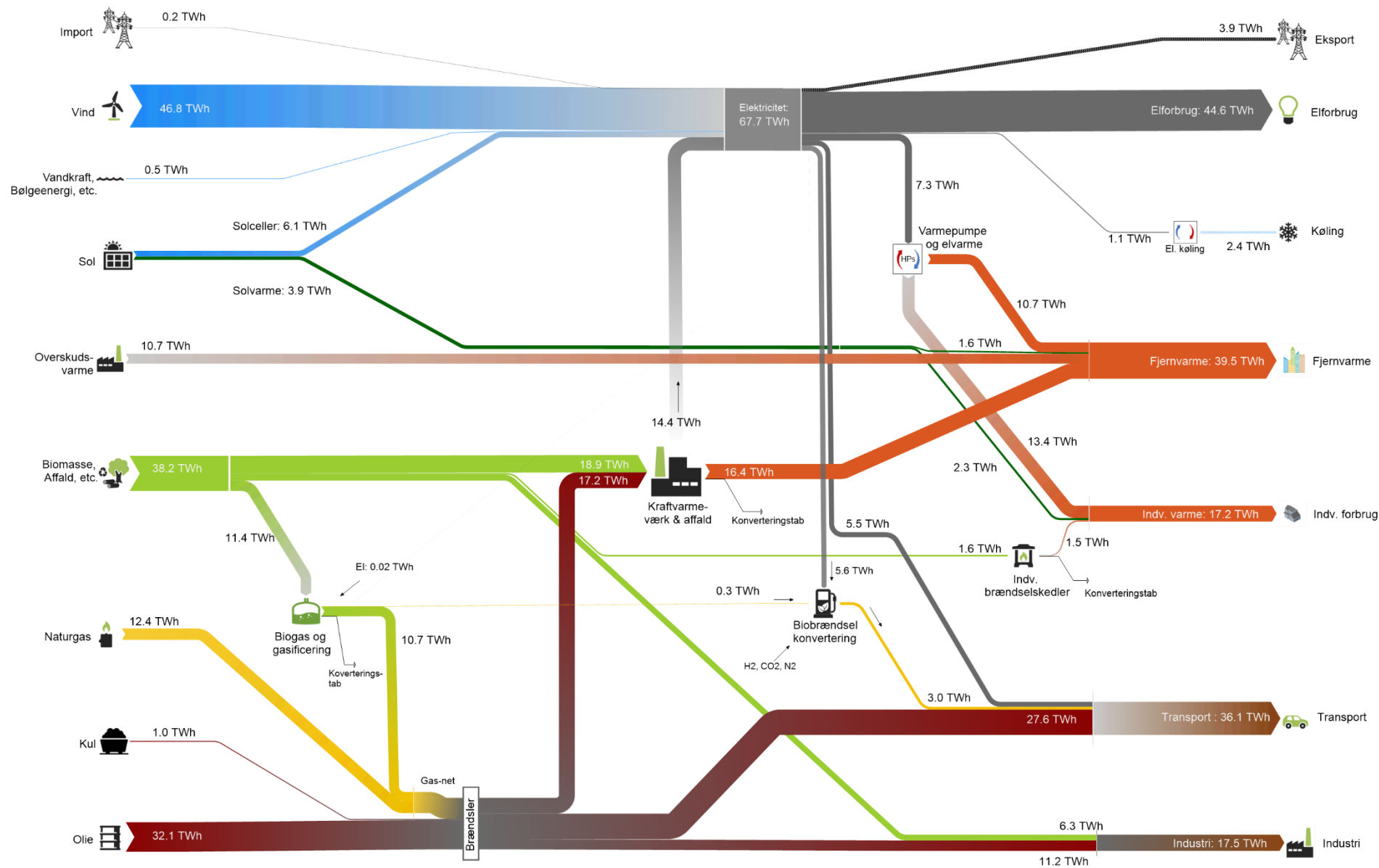
IDAs Klimasvar kan realiseres med eller uden energiøer. I givet fald er det vigtigt, at energiøernes produktion indtænkes i det samlede energisystem, så mulighederne for fleksibilitet og udnyttelse af varme fra fx brint produktion er analyseret inden, de endelige beslutninger tages omkring hvordan, de danske energiøer skal indgå i power-to-x produktion.

Figur 7. Sankey-diagrammer for IDAs Klimasvar sammenlignet med Danmark 2020

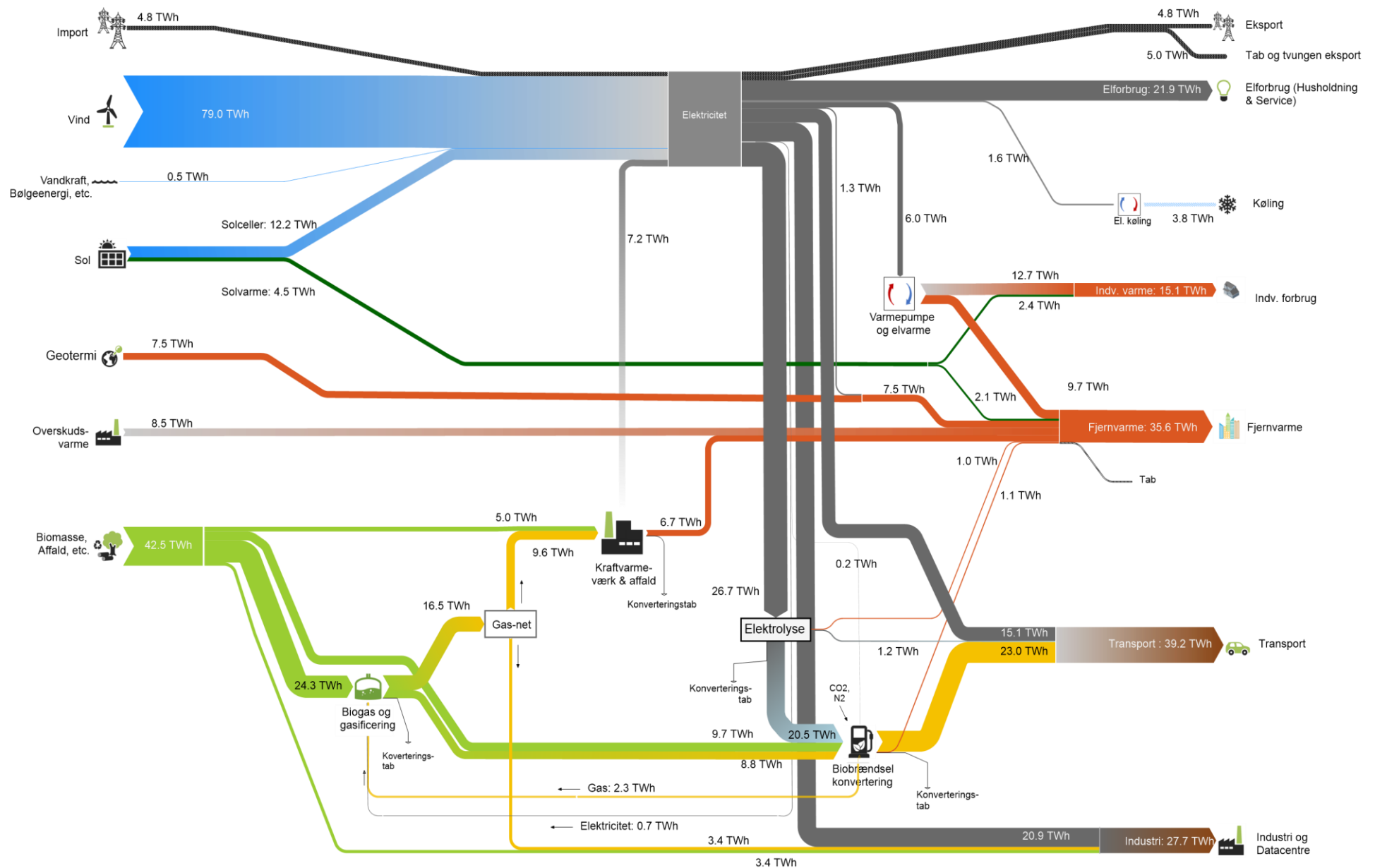
2020



2030



2045



1 Baggrund og overordnede principper

Startende i 2006 (Lund & Mathiesen, 2006) og efterfølgende i 2009 (Mathiesen, Lund & Karlsson, 2009) og i 2015 (Mathiesen *et al.*, 2015) har IDA fremsat forslag til, hvordan Danmark kan opnå en energiforsyning baseret 100 pct. på vedvarende energi i 2050. I 2019 har IDA yderligere formuleret en række anbefalinger til, hvad man kan gøre for at fremrykke gennemførelsen af disse forslag med henblik på at kunne opfylde målsætningen om en 70 pct.'s reduktion i CO₂-emissionerne allerede i 2030. I den forbindelse har IDA også argumenteret for at fremrykke målsætningen om 100 pct. vedvarende energi og CO₂-neutralitet til tidligere end 2050.

I det følgende fremlægger IDA et konkret forslag til, hvordan Danmark kan opnå målsætningen om 70 pct. CO₂-reduktion i 2030 og samtidig være forberedte på næste skridt, en klimaneutral forsyning baseret på 100 pct. vedvarende energi i 2045.

I dette, såvel som i de tidligere forslag fra IDA, er der fokus på:

- Hvordan Danmark opnår målene om vedvarende energi og CO₂-reduktion på en teknologisk hensigtsmæssig og samfundsøkonomisk fornuftig måde.
- Hvordan Danmark kan bruge den grønne omstilling til at skabe industriel udvikling og jobs.
- Hvordan Danmark kan lave den grønne omstilling inden for rammerne af et bæredygtigt forbrug af biomasse.
- Hvordan Danmark kan styrke sin position indenfor energiplanlægning og grønne nøgleteknologier.

Ud over disse fokuspunkter er der formuleret følgende to overordnede principper, som har været bærende for udviklingen af IDAs forslag:

1. Danmark bør opfylde målsætningen om 70 pct.'s CO₂-reduktion i 2030 på en måde, så det passer godt ind i at opnå 100 pct. vedvarende energi og klimaneutralitet i 2045. Det betyder:

- at vi frem til 2030 bør vælge de teknologier, som er hensigtsmæssige for at kunne tage de næste skridt i årene efter 2030.
- at vi frem til 2030 bør have fokus på at udvikle de nye teknologier, vi får brug for i næste omgang, også selvom de ikke nødvendigvis gør den store forskel i 2030.

2. Danmark bør opfylde målsætningerne om vedvarende energi og CO₂-reduktion på en måde, så det passer ind i, at resten af Europa og i sidste ende, at resten af verden kan gøre det samme. Det betyder:

- at vi skal forholde os til Danmarks andel af bl.a. den internationale fly- og skibstransport og bidrage til at nedbringe klimagasser fra disse transportformer, også selvom de ikke er med i FN-måden at opgøre vores forpligtigelser på.
- at vi skal holde os inden for Danmarks andel af verdens bæredygtige biomasse-ressourcer.
- at vi skal bidrage med vores andel af både fleksibilitetsydelse og reservekapacitet på el-nettet i en europæisk sammenhæng.

2 Metode

De tidligere arbejder med energiscenarier i IDA peger på, at for at kunne finde de mest hensigtsmæssige tekniske og samfundsøkonomiske løsninger, er det afgørende at anlægge en helhedsbetragtning på energisystemet – også formuleret som "det smarte energisystem". Ved en sådan helhedsbetragtning har man fokus på, hvordan de forskellige sektorer kan hjælpe hinanden og på, hvor der er synergier, så man kan finde frem til de bedste og de billigste løsninger.

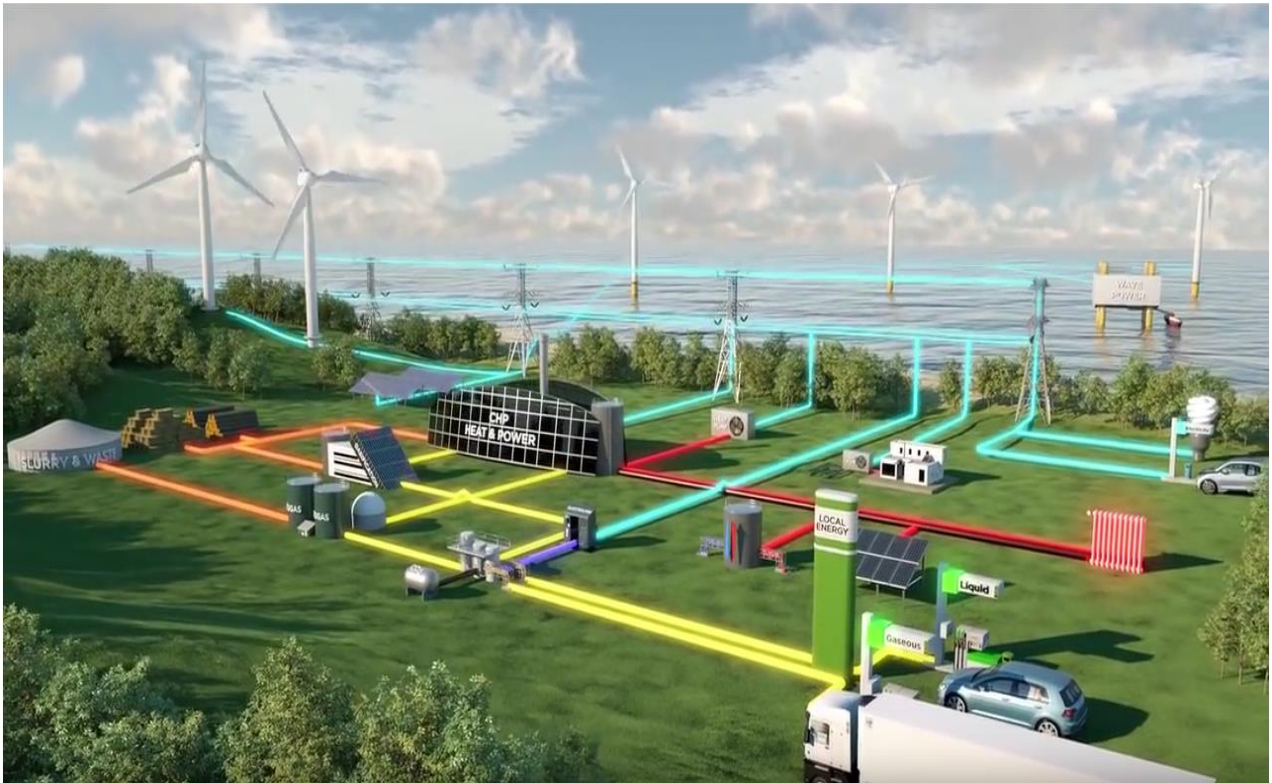
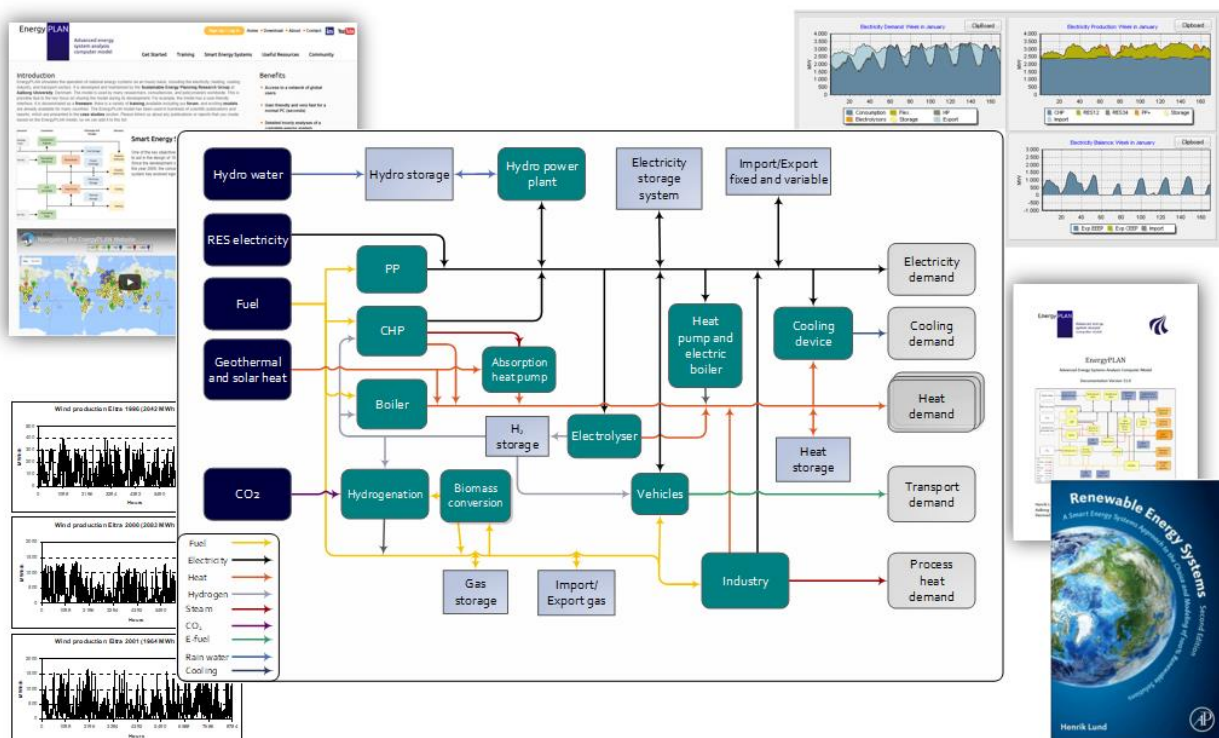


Illustration af det smarte energisystem, hvor der er fokus på sektorintegration og synergier med det formål at finde frem til de bedste og de billigste løsninger. (Se video på [her www.energyplan.eu/smartenergysystems](http://www.energyplan.eu/smartenergysystems))

IDAS forslag er gennemregnet i energisystemanalysemodellen EnergyPLAN, som har særlig fokus på at kunne analysere synergier i det smarte energisystem. Således gennemregner modellen timebalancer for de forskellige sektorer og energilagre samtidigt med, at der er fokus på, hvordan energi kan konverteres mellem sektorernes forskellige energibærere og lagermuligheder.



IDAs Klimasvar er gennemregnet på energisystem, analysemodellen EnergyPLAN, som med fokus på det smarte energisystems fordele foretager timesimuleringer med fokus på sektorintegration og energilagring (Lund & Thellufsen, 2019)

Det smarte energisystem tager udgangspunkt i, at der er meget store prisforskelle på om energi lagres som el, varme, køling, gas eller flydende brændsel. Der er derfor store omkostningsreduktioner forbundet med at sikre, at energien lagres på en hensigtsmæssig måde. Tilsvarende har det stor betydning for omkostningerne til infrastruktur i form el-, gas- og fjernvarmenet.

De detaljerede energisystemanalyser gør, at ubalancer kan kvantificeres og at løsningsforslag i form af forskellige former for energikonvertering og lagring kan gennemregnes.

IDAs Klimasvar har opstillet og gennemregnet en model for årene 2020, 2030 og 2045.

2.1 Modellering af Danmark 2020 – ENS2020

Modellen for 2020 er baseret på Energistyrelsens 2018 basisfremskrivning med enkelte justeringer. CO₂-emissionen for energi- og transport sektorerne ender på ca. 30 Mt CO₂ svarende til lidt under niveauet i den seneste statistik for 2017. Modellen er et bud på, hvordan 2020 forventes at blive – dog før indflydelsen fra Corona-krisen.

2.2 Modellering af IDAs Klimasvar 2030

Modelleringen af IDAs Klimasvar er gjort med udgangspunkt i de tidligere modeller og analyser i IDAs Energivision for årene 2035 og 2050. Dog er der foretaget følgende justeringer i grundlaget:

- Udviklingen i transportens energibehov er erstattet med Energistyrelsens seneste basisfremskrivning fra 2019 (BF2019) (Energistyrelsen, 2019b).
- Elforbruget er øget med et forventet elforbrug til store datacentre på 7 TWh i 2030 stigende til 10 TWh i 2045, hvorefter der er et sammenligneligt elforbrug med BF2030.

Udover disse justeringer af energibehovet, er en række af de tidligere forslag forøget eller fremrykket for at kunne nå målet om 70 pct. reduktion i 2030 og ønsket om 100 pct. vedvarende energi og CO₂-neutralitet i 2045.

Det er værd at være opmærksom på, at BF2019 fremskriver en række ændringer i energisystemet, som forventes at være realiseret i 2030 med nuværende lovgivning og initiativer. Som følge heraf forholder fx Klimarådet i deres anbefalinger sig alene til de yderligere initiativer og investeringer, der skal til ud over basisfremskrivningen for at opnå en realisering af 70 pct. målsætningen. På det punkt er IDAs Klimasvar anderledes.

IDAs Klimasvar indeholder alle teknologiske ændringer og investeringer hele vejen fra dagens 2020 energisystem til en realisering af 70 pct. målsætningen i 2030 samt fuld klimaneutralitet i 2045.

Det gør vi for at kunne vurdere alle omkostninger og alle konsekvenser ift. CO₂ -reduktioner og beskæftigelse for hele ændringen af Danmarks energisystem, også de der allerede er politisk besluttede og derfor indeholdt i Energistyrelsens fremskrivning.

2.3 Modellering af 100 pct. VE og klimaneutralitet i 2045

IDAs Klimasvar er publiceret i to omgange. I første omgang (maj 2020) blev der ikke foretaget en ny konkret modellering og analyse af år 2045. I stedet blev det gennemregnede forslag fra IDAs Energivision for året 2050 brugt som pejlemærke. I denne nye opdaterede version IDAs Klimasvar 2045 (juni 2021) er der udarbejdet et nyt gennemregnet forslag. Forslaget ligger i naturlig forlængelse af IDAs Energivision for 2050. Dog er det nu målet, at realiseringen fremrykkes til 2045, samt at der som følge heraf foretages visse justeringer. En af de væsentligste er, at det forventes, at andelen af direkte elektrificering af transporten bliver højere end i IDAs Energivision. Herudover er der gået mere i detaljen med biomasseanvendelsen, og hvordan energisektoren spiller sammen med de øvrige sektorer i forhold til at opnå fuld klimaneutralitet.

I opgørelsen af investeringsomfanget er IDAs Klimasvar 2045 sammenlignet med en reference defineret med udgangspunkt i forslaget for 2030 på følgende måde:

- 1) Udgangspunktet har været IDA2030. Dermed reflekterer teknologisammensætningen og mængden af vindmøller et scenarie på ca. samme stadie som foreslået i IDA2030.
- 2) Behovene er fremskrevet i overensstemmelse med princippet for IDA2045, bare ikke med ekstra besparelser. Det betyder konkret:
 - a. Varme: Det samlede varmemeforbrug øges fra 46.16 TWh i 2030 til 49.33 TWh, hvilket reflekterer en stigning pga. nybyggeri. Udbygningen af varmebehovet er sket ligeligt i alle varmeområder (fjernvarme og individuel varme).

- b. Elforbrug øges fra samlet set 43.87 TWh i 2030 til 46.10 TWh, hvilket reflekterer et øget klassisk elforbrug, flere datacentre og færre besparelser.
 - c. Industri antages at være ens med 2030 scenariet. Dette gælder både for el, varme, køling og brændsel til industri.
 - d. Transportbehovet ændres, ved at antage de samme vækstrater som i 2045 scenariet, men at andelen mellem de enkelte drivmidler er sammenlignelig med 2030 scenariet. Det gør, at der totalt set er ca. 1,4 mio elbiler og 0,4 mio hybridbiler i 2045 referencen. I modsætning til IDA2030 er her også indregnet internationalt fly og transport, som øger det samlede transportbehov.
- 3) Samlet set giver dette et højere elforbrug i systemet. Der er derfor tilføjet 1300 MW termiske kraftværker, for at sikre samme balance mellem import og eksport, som IDA2030 scenariet er designet efter.
- 4) Omkostningerne er vist i appendiks A.

2.4 Opgørelse af de samfundsøkonomiske omkostninger

Anlægsomkostninger, levetider og drift- og vedligeholdelse er som udgangspunkt baseret på Energistyrelsen og Energinets Teknologikatalog. I omkostningsopgørelsen er de omregnet til en årlig udgift baseret på en samfundsøkonomisk kalkulationsrente på 3 pct. Hvor omkostninger ikke foreligger i Teknologikataloget, eller hvor andre omkostninger er mere relevante, er det angivet under de enkelte afsnit. Mht. brændselspriser og håndteringsomkostninger er anvendt Energistylens seneste fremskrivning for 2030 priser (oktober 2019) (Energistyrelsen, 2019d). Naturgas "handling costs" er ekskl. sunk cost således, at det så vidt muligt afspejler mulighederne for at spare givet, at der er investeret i gasnettet. De konkrete tal fremgår af appendiks A.

Energistyrelsen forventer en gennemsnitlig samfundsøkonomisk elpris på 50,94 EUR/MWh i 2030. I timesimuleringerne af IDAs Klimasvar er der taget udgangspunkt i prisvariationer på det nordiske el-marked Nord Pool Spot i 2013 (samme år der anvendes vind- og soldata fra), som er justeret til, så gennemsnitsprisen bliver 51 EUR/MWh. Herudover regner modellen med en vis priselasticitet således, at stor eksport af strøm fra Danmark reducerer prisen, og stor import øger prisen i den enkelte time.

2.5 CO₂-emission fordelt på forbrugssektorer

I IDAs klimasvar er CO₂-emissionen fordelt på forbrugssektorer. I den forbindelse er anvendt følgende principper:

- Den enkelte sektors forbrug af biogas hhv. naturgas er fordelt efter det samme forhold som for hele energisystemet, dvs. ca. 52 pct. er naturgas og resten er biogas i 2030. Der er i 2030 anvendt gas i industri, kraftvarme og kraftværker.
- Den enkelte sektors CO₂-emission fra produktion af el er fordelt efter, hvordan den samlede mængde el er produceret i det samlede energisystem. Dvs., der er en mindre CO₂-emission hidrørende fra naturgas i kraft- og varmegværker i 2030 og en noget større emission i 2020.

Disse principper har alene at gøre med, hvordan den samlede CO₂-emission fordeles på sektorerne. For 2045 er det mere simpelt, idet der ikke mere optræder fossile brændsler.

3 CO₂-reduktioner og opgørelser nu og i fremtiden

IDAs Klimasvar omfatter ikke alle emissionssektorerne. Vi har afgrænset os til energi og transport (figur 1). Det betyder, at vi har defineret en sammenhæng, hvor de andre sektorer også bidrager til opfyldelsen af den samlede målsætning. Ud over energi og transport drejer det sig om industrielle processer, landbrugets arealanvendelse samt øvrigt, som blandt andet omfatter affaldsdeponi og spildevandsrensning.

3.1 IPCC's regler for beregning af CO₂-emissioner

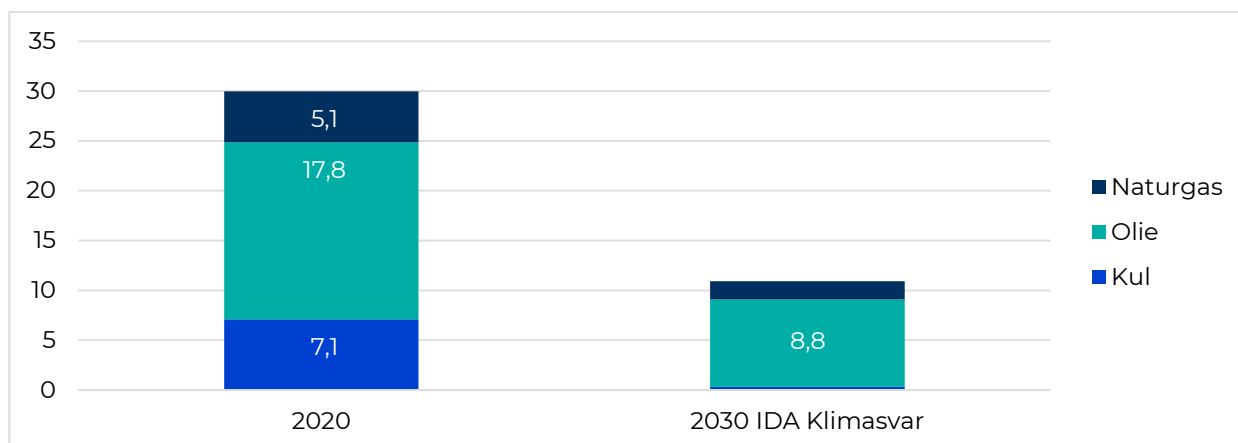
Opgjort efter de seneste regler (hvor arealanvendelsen LULUCF skal medregnes) var klimagas-emissionen i 1990 75,7 Mt. Med en 70 pct.'s reduktion skal den nedbringes til 22,7 Mt i 2030. IDAs Klimasvar forudsætter, at de andre sektorer reducerer fra en forventet emission på 17 Mt i 2020 til 11,7 Mt i 2030. Målet for energi og transport bliver således, at en forventet emission i 2020 på 30 skal reduceres til ca. 11 Mt i 2030. Ved fastlæggelsen af denne fordeling er der skelet til resultaterne af og løsningerne fra de mange erhvervsklimapartnerskaber, der afleverede deres løsningsforslag i marts 2020.

For 2045 er målet for energi og transport, at CO₂-emissionen bringes helt ned til nul målt efter FN-opgørelsesmetoden. Som forklaret i det følgende vil der dog være et klimagasbidrag fra fly udover selve CO₂-emissionen. Det er derfor yderligere målet for 2045, at der etableres grundlag for via sink i form af biochar og CCS til at kompensere for dette samt yde et bidrag til tilsvarende kompenserende af klimagasser fra de øvrige sektorer.

Regeringens målsætning om en 70 pct.'s reduktion i CO₂-emissionen i 2030 (målt ift. 1990) er defineret iht. regler fastsat af International Panel on Climate Change (IPCC). For det enkelte land medregnes iht. Kyoto og UNFCCC forpligtelserne den CO₂-udledning, som direkte kan henføres til aktiviteten i det gældende land. Ift. energisystemet gælder det fx stationære anlæg og indenrigstransport i landet, hvorimod international transport ikke medtages i lande-opgørelserne. International transport dækker her international land-, fly- og søtransport.

Emissionerne for fossile brændsler henføres til det land, hvori de afbrændes, mens det for biomasse gælder, at emissionerne skal henregnes til det land, som biomassen stammer fra. Emissionerne indgår som en del af punktet LULUCF. LULUCF er en forkortelse for Land Use, Land Use Change and Forestry. Det betyder, at der ingen emission skal medregnes for importeret biomasse, samt at emissionen fra indenlands biomasse er med i landets opgørelse af LULUCF. IDAs Klimasvar udregner CO₂-emissionen efter UNFCCC metoden, så der direkte kan sammenlignes ift. opfyldelsen af 70 pct.'s målsætningen. Dvs., at emissionerne fra den danske andel af international transport og importeret biomasse ikke er medtaget. Opgjort på denne måde er CO₂-emissionerne vist i figur 8 fordelt på brændsel. For 2045 scenariet er opgørelsen nul.

Figur 8. CO₂-emissioner fordelt på brændsler opgjort efter FN-opgørelsesmetoden.



IDAs Klimasvar peger dog på, at Danmark allerede nu bør forholde sig til international transport, samt mængden og typen af biomasse vi anvender i vores energisystem. Der er derfor her foretaget to regnestykker, hvor betydningen af disse to punkter er illustreret.

3.2 CO₂-emissioner fra biomasse

I det første regnestykke er vist, hvordan CO₂-emissionerne ser ud, hvis der indregnes et CO₂-bidrag opgjort efter den såkaldte "Cradle-to-gate"-metode set i en 100 års tidshorisont.

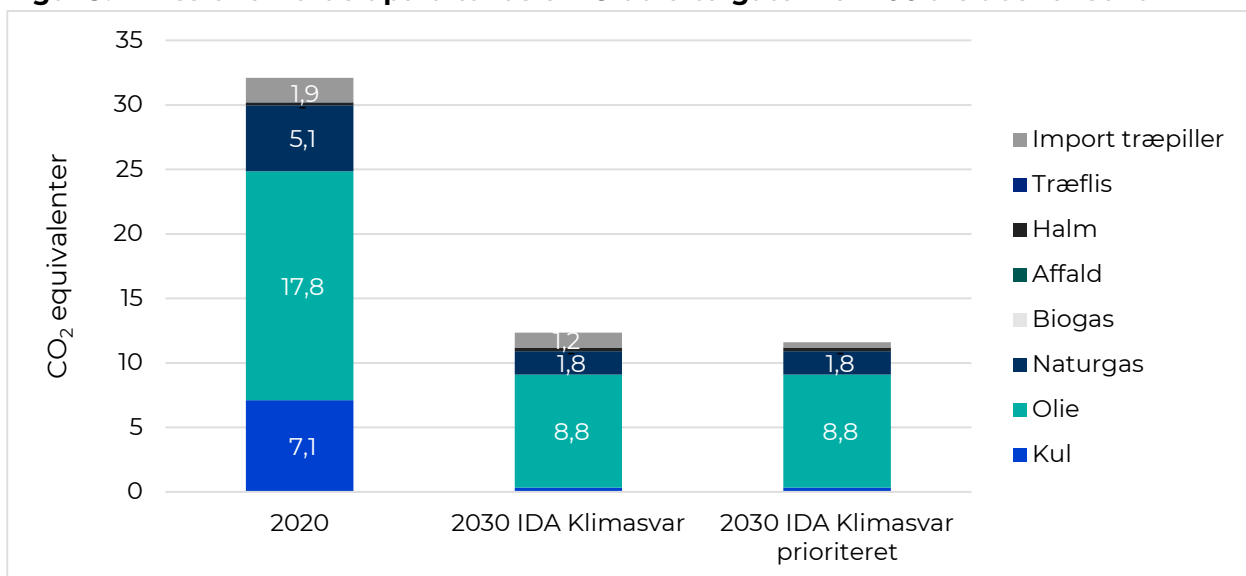
Opgørelsen er gjort med udgangspunkt i tabel 4-4 side 105 i rapporten *Carbon footprint of bio-energy pathways for the future Danish energy system* (SDU & COWI, 2014). Ud fra denne rapport, samt samtaler med Henrik Wenzel (SDU) om fortolkning af tallene inkl. seneste justeringer, er anvendt følgende CO₂-emissions faktorer for biomasse:

- For biogas og biogent affald er anvendt faktoren 0. For biogas vil faktoren være negativ, som følge af de positive effekter biogas har i landbruget. Her forudsættes disse dog medtaget under landbrugssektoren.
- For afbrænding af halm er der regnet med en faktor på 11 kg CO₂ pr. GJ. Når faktoren ikke er nul, er det et udtryk for, at halm alternativt ville være nedmuldet, og at en del af kulstofet derved vil blive bevaret som humus i jorden. Hvis halm bruges til biogas, er faktoren 3-4 kg CO₂ per GJ.
- For træflis fra danske skove er der tilsvarende regnet med en faktor på 0,02 kg CO₂ pr. GJ. Det er forudsat, at der er tale om udtynding, der alternativt ville rådne i skovbunden, men her ender en væsentlig mindre del som kulstof i jorden.
- Importeret træpiller og træflis afhænger af, hvor det stammer fra, og i rapporten angives værdier mellem 0 og 200. Ifølge modellerne bag SDU & COWI-studiet fra 2014 vil det ligge i området 30-40 kg CO₂ pr. GJ, mens andre kilder mener, det bør ligge på et niveau af 9-17 kg CO₂ pr. GJ. Her er valgt 25 kg CO₂ pr. GJ.

Det skal understreges, at især de to sidste værdier er behæftet med store usikkerheder, idet de afhænger af oprindelsen af træressourcer. Der er også studier, der viser, at hvis man gennem skovdrift kan undgå metanudslip i en oprindelig urskov, vil det have en stor positiv effekt. Det vurderes dog ikke umiddelbart, at træpiller, der importeres til Danmark, vil stamme fra skov, der alternativt ville have ligget urørt som urskov.

Resultatet er vist i figur 9. Opgjort på denne måde udgør CO₂-bidraget fra biomasse i størrelsesordenen 1,9 Mt i 2020 (søjle 1) faldende til 1,2 Mt i 2030, hvis biomassen til de store kraft/varmeverker fortsat importeres (søjle 2). Hvis der aktivt prioriteres kun at aftage træpiller/flis fra udtynningstræ/ammetræ fra bæredygtig skovdrift, vil bidraget kunne sænkes til i størrelsesordenen det halve, dvs. 0,4 Mt i 2030 (søjle 3).

Figur 9. Emissioner fordelt på brændsler "Cradle-to-gate" i en 100 års tidshorisont



3.3 Den danske andel af den internationale transport

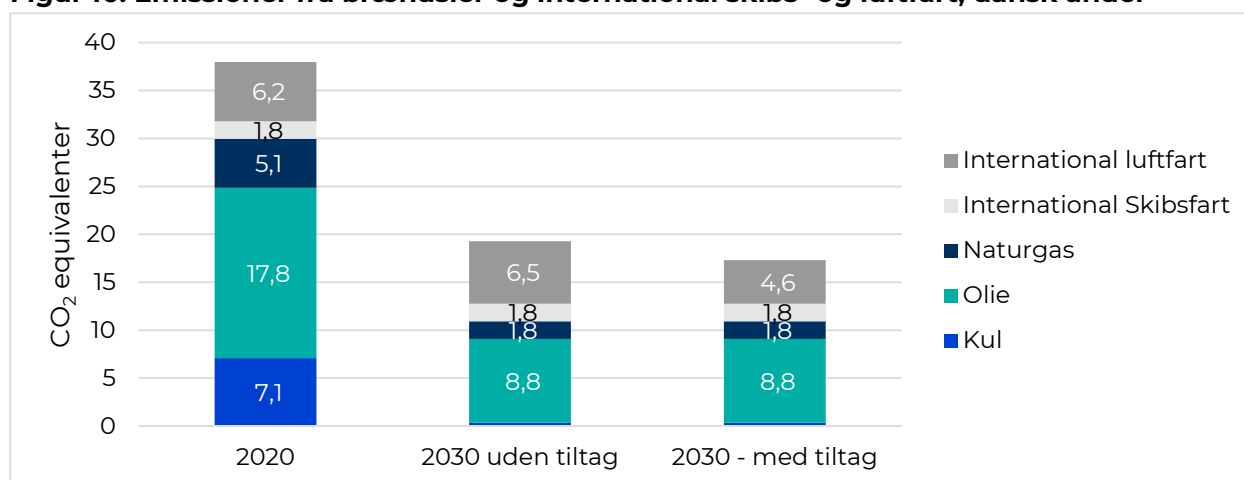
I det næste regnestykke er indflydelsen af international transport forsøgt illustreret. Princippet fra IDAs Energivision er at afgrænse transportsektoren på en måde, at hvis alle andre lande gør det samme, vil vi få hele verdens energiforbrug med en gang og kun en gang. Her er der, til at illustrere pointen, anvendt Energistyrelsens tal for international luftfart, som i 2020 er opgjort til forventet 41,6 PJ stigende til 44,1 PJ i 2030. Yderligere er der tillagt et tilsvarende brændselsforbrug til den danske andel af international skibstransport på 24,9 PJ. I appendiks B er der nærmere redegjort for valget at disse tal.

Ud over selve CO₂-emissionen har fly også andre klimaeffekter. Det drejer sig bl.a. om NO_x'er og contrails fra vanddamp (de hvide striber efter flyene) udledt i de øvre atmosfærelag.

Der er store forskelle på de enkelte flyvninger. Drivhusgasemissionen for et propelfly i lav flyvehøjde vil næsten kun bestå af CO₂, mens et interkontinentalt jetfly fra Europa til Nordamerika vil

flyve i stor højde i arktiske områder, hvor grænsen til de øvre atmosfærelag ligger lavest og dermed har en drivhusgaseffekt, der er adskillige gange større end den, der kommer fra CO₂. Det er et felt, hvor der er store forskningsmæssige usikkerheder. Den tyske organisation *Atmosfair*, der sælger kompensationer for flyrejser, har gjort et omfattende arbejde for at kortlægge dette fænomen, så man som flyrejsende kommer til at kompensere den fulde mængde drivhusgasser. Deres model går ud fra, at flyvning under 9.000 m's højde kun har CO₂-klimaeffekter, mens flyvning over 9.000 m har non-CO₂-klimaeffekter, der er dobbelt så store som CO₂-effekten – altså en faktor 3. Her er beregningerne vist med en antagelse om en faktor 1 for national og en faktor 2 for international luftfart. Med disse forudsætninger er regnestykket vist i figur 10.

Figur 10. Emissioner fra brændsler og international skibs- og luftfart, dansk andel



Uden tiltag vil international luftfart bidrage med i størrelsesordenen 6-7 Mt i 2030. Hvis der gennemføres tiltag (som beskrevet senere) til at dæmpe væksten, erstatte flybrændstof med elektrobrændstof eller bæredygtigt biobrændstof samt reducere flyvehøjden, vil bidraget kunne sænkes til fx 4-5 Mt i 2030. Det sidste forudsætter (som beskrevet senere) dog et indgående internationalt samarbejde.

Ovenstående regnestykker er, som beskrevet, behæftet med en vis usikkerhed, men de viser pointen om, at Danmark bør forholde sig til forhold omkring egne udledninger, der ikke er inkluderet i 70 pct.'s målsætningen. IDAs Klimasvar inddrager disse forhold på følgende måde:

1. IDAs Klimasvar tager fat i biomasseproblematikken ved at fokusere på:
 - at Danmark nedbringer sin afhængighed af afbrænding af biomasse,
 - omlægger til primært indenlandske biomasse-ressourcer med prioritet til biomasse med lave CO₂-emissioner, samt
 - forbereder Danmark på at begrænse os til Danmarks andel af mængden af et globalt bæredygtigt biomasseforbrug.
2. IDAs Klimasvar medtager anbefalinger til, hvordan Danmark kan nedbringe CO₂-emissionerne på den internationale transport allerede i 2030 og på sigt gøre den CO₂-neutral i 2045.

4 IDAs forslag opdelt på fire forbrugssektorer og fem tværgående temaer

I det følgende beskrives IDAs forslag opdelt på fire forbrugssektorer og med fokus på fem tværgående temaer.

De fire forbrugssektorer

Varme: Opvarmning af bygninger

Industri: Service, erhverv, tung industri inklusive Nordsøen

Transport: Person og godstransport inklusive fly og skibe.

El: Primært det "klassiske elforbrug", idet nyt elforbrug til varme, transport og industri medtages under de respektive sektorer i form af vindkraft. Sektoren inkluderer den overordnede indregulering og udveksling med el.

De fem tværgående temaer

Energieffektivitet: Herunder opfyldelsen af EU's energieffektiveringsdirektiv.

Sektorintegration: Inklusive energilagring, konvertering og elektrificering samt integration med el-, gas- og fjernkøling-nettene samt PtX.

Biomasse: Med fokus på opfyldelsen af kravet om bæredygtig biomasse.

Vedvarende energi: Hvilke former for VE og hvor meget.

Teknologiske udfordringer: Oplisting af de vigtigste teknologiske udfordringer med fokus på, hvordan vi som samfund forbereder os på tiden efter 2030. Her fremhæves også vigtige eksport potentialer.

De enkelte sektorer vurderes herefter på følgende parametre:

- Bidrag til CO₂-reduktionsmålsætningen (Mt CO₂/år).
- Den samfundsøkonomiske omkostning herunder sektorens gennemsnitlige CO₂-reduktionsomkostning (DKK/ton CO₂).

Endelig oplistes en række forslag til centrale virkemidler for hver sektor. Listen over virkemidler skal ikke betragtes som en udtømmende liste, der korresponderer én til én med en realisering af IDAs Klimasvar. Listen skal ses som et idekatalog, der supplerer andre gode forslag, som er bragt i spil af klimaerhvervspartnerne, Klimarådet og andre deltagere i debatten om en dansk klimahandlingsplan.

IDAs virkemiddelforslag har særlig opmærksomhed på, hvad der er vigtigt for at sikre folkelig opbakning og en hensigtsmæssig teknologisk udvikling ift. en god udnyttelse af Danmarks styrkepositioner og potentialer for industriel udvikling og arbejdspladser. Forslagene har derfor fokus på:

- At udnytte teknologiske styrkepositioner og skabe arbejdspladser.
- At fremme en teknologiudvikling, der kan bringe os videre efter 2030.
- At sikre energieffektivitet bl.a. iht. EU's energieffektiviseringsdirektiv.
- At tilstræbe, at vi opnår 70 pct.'s målsætningen på en samfundsøkonomisk effektiv måde.
- At sikre en bred folkelig inddragelse i gennemførelse af de politiske målsætninger.

Oversigt over IDAs Klimasvar

IDA 70 pct. 2030 - Oversigt	Varme	Industri	Transport	Elektricitet
Energieffektivitet (opfyldelse af EU's energieffektiviseringsdirektiv).	<ul style="list-style-type: none"> - Besparelser i alle bygninger (12 pct. i 2030 og 30 pct. i 2045) - Gradvis omlægning til 4G fjernvarme (halvt i 2030, helt i 2045) - Anvendelse af bygningsreglementets renoveringsklasser som mål for renovering. 	<ul style="list-style-type: none"> - Besparelser og effektiviseringer på 12 pct. i 2030 (24 PJ inkl. effektiviseringer i el, varmepumper, fjernvarme og fjernkøling) og 32 pct. i 2045. - Besparelser i datacentre (5 pct. af el). 	Afdæmpning af vækst i personbil km ift. vækst i basisfremskrivningen (1,6 pct./år i stedet for 2 pct./år). <ul style="list-style-type: none"> - Omlægning af person-km. fra biltransport (2 pct.) og fly (10 pct.) til tog og kollektiv trafik nationalt i 2030. I 2045 yderligere fra biltransport (25 pct.) og fly (87 pct.) - Omlægning af person-km. fra biltransport (2 pct.) til cykler i 2030 og yderligere (5 pct.) i perioden mod 2045. - Omlægning af person-km. fra international flytransport (17 pct.) til international togtransport i 2045. - Afdæmpe væksten i brændselsforbrug med 10 pct. i nationale og internationale fly. 	<ul style="list-style-type: none"> - 10 pct. besparelser i det "klassiske elforbrug" i 2030 (20 pct. i 2045).
Sektorintegration (lager, konvertering og elektrificering).	<ul style="list-style-type: none"> - Olie- og gasfyr afvikles inden 2030 og erstattes med fjernvarme og individuelle varmepumper - Fjernvarme udvides til 63 pct. af varmebehovet, primært på bekostning af naturgasområder - Individuelle varmepumper, primært udenfor eksisterende naturgasområder - Overskudsvarme fra industri og datacentre - Overskudsvarme fra elektrolyseanlæg - Fjernvarme til biogasanlæg og industri - Store varmelagre, særligt i større fjernvarmenet. 	<ul style="list-style-type: none"> - Omlægning til fjernvarme (7 PJ i 2030 og 12 PJ i 2045) - Fjernkøling med kølelagre (3 PJ i 2030 og 5 PJ i 2045) - Varmepumper for resterende rumvarmebehov (3,5 PJ i 2030 og 7 PJ i 2045) - El erstatter fossil (17 PJ inkl. varmepumper) - 300 MW offshore vind erstatter 3,5 TWh Naturgas på boreplatformene i 2030 og indgår i elforsyningen i 2045. 	<ul style="list-style-type: none"> - Benzin og diesel til biler reduceres fra nu 102 PJ til 59 PJ svarende til, at antallet reduceres fra 2,6 til 1,5 -2 millioner biler i 2030 og ingen i 2045. - 1,3 mio. elbiler eller plug-in-hybridbiler i 2030 og 3,3 mio. elbiler i 2045. - 35 pct. af busser og 30 pct. af varevogne på batteridrift eller plug-in-hybrid i 2030 og tilsvarende 75 pct. af busser og 100 pct. af varevogne i 2045. - 20 pct. af brændselsforbruget i motorcykler og i forsvaret på el i 2030 og 50 pct. i 2045. - 5 pct. lastbiler på batteridrift eller plug-in-hybrid og 5 pct. af lastbiler direkte el i 2030 (e-roads). 35 pct. lastbiler på batteridrift, og 400 km e-roads i 2045. - 20 pct. elektrofuels (DME/metanol) til lastbiler og varevogne (9,8 PJ) i 2030. 10 pct. brint og 55 pct. elektrofuels til lastbiler i 2045. - 10 pct. ammoniak til skibe i 2030 (0,6 PJ). Al indenrigs og 10 pct. af udenrigs færgetransport på el i 2045. Resten på ammoniak og elektrofuels. - 2 pct. elektrofuels (jetfuel) til nationale fly (0,3 PJ) i 2030. I 2045 dækkes i alt 14 pct. af international flytransport af el og brint og resten af elektrofuels. - 1200 MW elektrolyse 2030 og 4800 MW i 2045. - CO₂-capture til elektrofuels fra diverse punktkilder. 	<ul style="list-style-type: none"> - Indregulering af vind, sol og bølgekraft med varmepumper og elektrolyseanlæg fra de andre sektorer - Nedlæggelse af kulkraftværker - Fokus på nedregulering af eksisterende biomasseværker, når der er overskud af el-produktion fra vind-, sol- og bølgekraft - Bevarelse af decentrale gasfyrede kraftvarmeværker samt opførelse af nye gasfyrede kraftvarmeværker for at sikre effekt.

<p>Biomasse (holdes på et bæredygtigt niveau)</p> <p>Affald reduceres til fordel for genbrug/genanvendelse.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Træ, affald og biogas i kraft/varmeverker - Træflis og halm i fjernvarmekedler i 2030. Gradvis overgang til biogas i 2045 - Træpiller til et mindre antal individuelle fyr. 	<ul style="list-style-type: none"> - 23 PJ Biomasse i 2030 og 12 PJ i 2045 erstatter fossile brændsler - 8 PJ Biogas i 2030 og 12 PJ i 2045 erstatter fossilt fossile brændsler. 	<ul style="list-style-type: none"> - 200 MW forgasning af træflis (syngas og CO₂ til elektrofuels) i 2030 og ca. 2000 MW i 2045 fordelt på forgasning, HTL og Pyrolyse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Biogasproduktionen forøges til 35 PJ i 2030 og 60 PJ i 2045 - Træflis og halm i kraftvarmeverker og fjernvarmekedler i 2030, dog primært opgraderet biogas i 2045.
<p>Vedvarende energi</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 800 MW vindmøller til individuelle varmepumper i 2030 og i 2045 - 8-9 PJ-solvarme til individuelle boliger til supplement af varmepumper - 500 MW / 13-14 PJ geotermi til fjernvarme i 2030, stigende til 1.000 MW i 2045 - 500-600 MW vindmøller til store varmepumper i fjernvarmen i 2030 og i 2045 - 6-7 PJ-solvarme til fjernvarme i 2030 stigende til 7-8 PJ i 2045. 	<ul style="list-style-type: none"> - 300 MW vindmøller til boreplatforme i 2030, som indgår i den almindelige elforsyning i 2045. 	<ul style="list-style-type: none"> - 2.700 MW off-shore vind i 2030 og 9750 MW i 2045 til el køretøjer, CO₂-capture og elektrolyse. 	<ul style="list-style-type: none"> - 130 MW bølgekraft. - 5.000 MW i 2030 og 10.000 MW i 2045 solceller på store tage (nu 1.000 MW). - Mindst 4.800 MW i 2030 og 5000 MW i 2045 onshore vindkraft onshore (nu 4.200 MW). - 6.630 MW i 2030 og ca. 14000 MW i 2045 vindkraft offshore (nu 2.000 MW).
<p>Teknologiske udfordringer</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Store sæsonvarmelagre, særligt i fjernvarmeforsyningen - Geotermi - Overgang til 4G fjernvarmesystemer - Overskudsvarme fra datacentre og elektrolyseanlæg til fjernvarme. 	<ul style="list-style-type: none"> - Integration af datacentre i fjernvarmesystemet - Produktionsomlægninger i industrien til el, biomasse og biogas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Storskala intelligent opladning af el-køretøjer - E-roads til lastbiler med delvis batteridrift - Fra simpel årlig roadpricing til avanceret GPS-baseret roadpricing - Elektrolyseanlæg med fleksibel drift (fuldlasttid på cirka 50 pct.), herunder mere effektiv elektrolyse (SOEC) - Integrerede fleksible elektrofuels-produktioner med, store brintlagre, Carbon Capture anlæg, CO₂-lagre og kemisk syntese (DME, Metanol, Ammoniak), herunder opskalering - Storskala forgasning af biomasse, pyrolyse og HTL. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fleksibel drift af eksisterende biomasse kraftvarmeverker - Bølgekraft (vindmøller som alternativ) - Intelligent integration af vind og sol i elnettet (herunder placering af nye anlæg og undgå unødigt udbygning af elnettet) - Anvendelse af halm til biogas.

5 Varme

Varmesektoren omfatter opvarmning af bygninger i Danmark. Det nuværende nettovarmebehov er opgjort til 181 PJ (50,38 TWh) i 2020. Frem mod 2030 forventes en forøgelse af nettovarmebehov på lidt over 8 PJ (2,35 TWh) som følge af nybyggeri. Tilsvarende forventes en yderligere forøgelse frem til 2045 på 11 PJ (2,9 TWh). Hertil kommer yderligere et mindre behov i forbindelse med udvidelser af fjernvarmenettet fra varmebehov, der i 2020 er medtaget under industri, som bliver tilsluttet fjernvarmen.

5.1 Energieffektivitet og varme

Som redegjort for i IDAs tidligere energiplaner og bekræftet af en række rapporter (Henrik Lund *et al.*, 2014; Mathiesen *et al.*, 2016; EA Energianalyse, 2018) er det samfundsøkonomisk fordelagtigt at nedbringe varmekonsumet i forbindelse med renovering af eksisterende boliger. Konkret foreslås her en 30 pct.'s besparelse frem mod 2045. Den bedste og billigste måde at gennemføre disse besparelser på er løbende i forbindelse med renoveringer. IDAs Klimasvar regner derfor med en besparelse på 1,2 pct. årligt, svarende til 12 pct. i 2030.

Energirenovering er afgørende ikke kun for at nedbringe varmebehovet, men også for at forbedre bygningerne til lavtemperatur fjernvarme og dermed overgangen til 4. generations (4G) fjernvarmeforsyning (H. Lund *et al.*, 2014). 4G fjernvarme sparer på grund af lavere temperaturnettab i fjernvarmeledningerne, men endnu vigtigere gør dette tiltag, at fjernvarmeforsyningen bliver markant mere effektiv. Lavere temperaturer øger effektiviteten på de fremtidige kilder til grøn varme såsom: Solvarme, varmepumper, kraft/varme, geotermi samt overskudsvarme fra industri og datacentre. I den forbindelse er det derfor afgørende, at man ved energirenovering af boligerne har fokus på såvel at nedbringe varmebehovet som at sænke kravet til, hvilken temperatur fjernvarmevandet eller varmepumpen skal forsyne med (Mathiesen *et al.*, 2016).

Konkrete tiltag

- Besparelser i alle bygninger (12 pct. i 2030 og 30 pct. i 2045).
- Gradvis omlægning til 4G fjernvarme (halvt i 2030, helt i 2045).
- Anvendelse af bygningsreglementets renoveringsklasser som mål for renovering.

5.2 Sektorintegration og varme

IDAs tidligere energiplaner samt øvrige analyser og rapporter (bl.a. varmeplan Danmark) (Dyrelund *et al.*, 2008), peger på det samfundsøkonomisk hensigtsmæssige i, at omlægge Danmarks ca. 500.000 huse med individuelle olie- eller naturgasfyr til enten fjernvarme eller individuelle varmepumper samt i den forbindelse at udvide fjernvarmeområdet med henblik på dels at kunne anvende mere overskudsvarme og dels at kunne tilføre det samlede system bedre fleksibilitet ift. indregulering af el-sektoren. I forbindelse med såvel udnyttelsen af overskudsvarme som tilvejebringelse af fleksibilitet er store varmelagre et afgørende (og i systemsammenhæng et meget omkostningseffektivt) element.

Konkrete tiltag

- Olie- og gasfyr afvikles inden 2030 og erstattes med fjernvarme og individuelle varmepumper.
- Fjernvarme udvides til 63 pct. af varmebehovet, primært på bekostning af naturgasområder.
- Individuelle varmepumper, primært udenfor eksisterende naturgasområder.
- Overskudsvarme fra industri og datacentre.
- Overskudsvarme fra elektrolyse anlæg.
- Fjernvarme til biogasanlæg og industri.
- Store varmelagre, særligt i større fjernvarmenet.

5.3 Biomasse og varme

IDA foreslår de eksisterende biomasse-kraft/varmeværker videreført til 2030 (Se afsnittet om el), men gradvist suppleret af store varmepumper, geotermi mv. Desuden anvendes der biomasse (halm og træflis) i fjernvarmekedler og lignende. Efter 2030 frem mod 2045 reduceres anvendelse af halm og træflis i kedler og kraft- og kraft/varmeværker i takt med at de nuværende anlæg ophører. Dog anvendes der fortsat en mindre mængde affald samt en mindre andel særligt tungt fast biomasse i affalds kraft/varmeværker.

Fjernvarmebidraget fra affaldsafbrænding regnes reduceret fra de nuværende ca. 40 PJ til 13 PJ, så energiudnyttelsen ikke står i vejen for mere genbrug og genanvendelse. Dog medregnes der et bidrag på 14 PJ fra organisk affald som input til biogasproduktion (Se afsnittet om biomasse).

Konkrete tiltag

- Træ, affald og biogas i kraft/varmeværker.
- Træflis og halm i fjernvarmekedler.
- Træpiller til et mindre antal individuelle fyr.

5.4 Vedvarende energi og varme

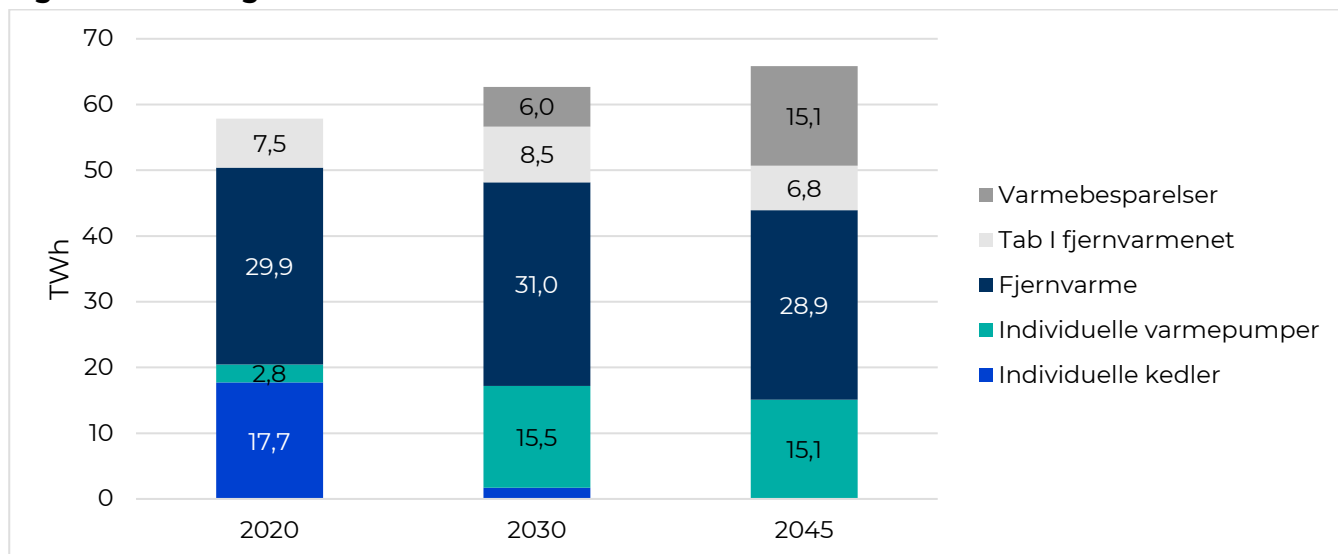
Generelt foreslås der en grøn varmeforsyning. Det betyder dels, at der bør etableres vindkraft svarende til elforbruget i de individuelle såvel som de store varmepumper, og dels at fjernvarme baseres på enten overskudsvarme eller vedvarende energi.

Konkrete tiltag

- 800 MW vindmøller til individuelle varmepumper i 2030 og i 2045.
- 8-9 PJ-solvarme til individuelle boliger til supplement af varmepumper.
- 500 MW / 13-14 PJ geotermi til fjernvarme i 2030 stigende til 1000 MW i 2045.
- 500-600 MW vindmøller til store varmepumper i fjernvarmen i 2030 og i 2045.
- 6-7 PJ-solvarme til fjernvarme i 2030 og 7-8 PJ i 2045.

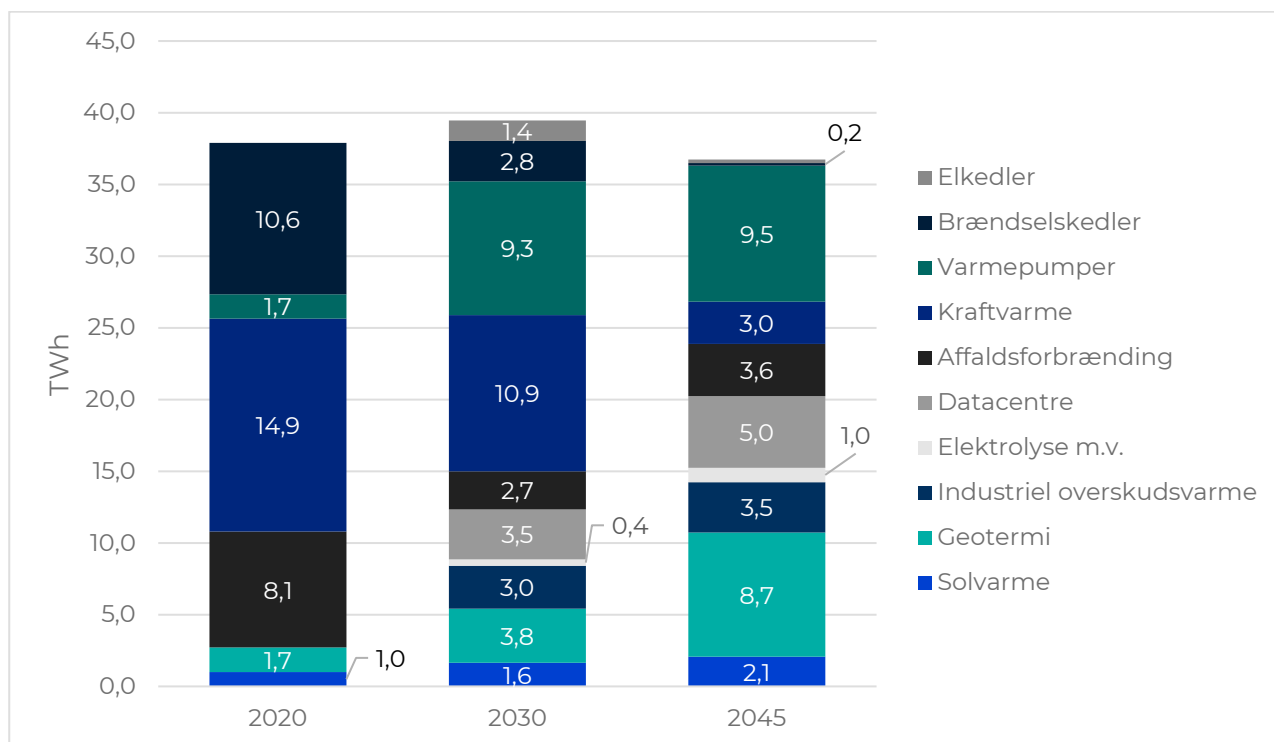
Figur 11 viser udviklingen i fordelingen af varme på besparelser, fjernvarme og individuelle kedler og varmepumper.

Figur 11. Udviklingen i varmebehov



Figur 12 viser udviklingen i fordelingen af fjernvarmeproduktionen.

Figur 12. Udviklingen i fjernvarmeproduktionen



5.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af varmesektoren

Generelt er varmesektoren karakteriseret ved, at de fleste teknologier er velkendte og afprøvede. De største udfordringer, og dermed behov for forskning og udvikling, forventes at være i forbindelse med storskala-udnyttelsen af følgende teknologier:

- Store sæson varmelagre, særligt i fjernvarmeforsyningen.
- Geotermi.
- Overgang til 4G fjernvarme systemer.
- Overskudsvarme fra datacentre og elektrolyseanlæg til fjernvarme.

5.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af varmesektoren

- Bygningsreglementet (BR) skal fremover adskille forbrug og produktion, have mere fokus på adfærd og mere fokus på bygningsmaterialer. BR skal have fokus på klimaskærmen og i kombination med andre politikområder sikre en effektiv varmeforsyning baseret på vedvarende energi:
 - For opnå "energieffektive bygninger" bør der i BR stilles krav om et maksimalt varmeforbrug (kWh/m²) for eksisterende bygninger, evt. opdelt for bygningstyper og aldersgrupper. Varmeforbruget i bygninger generelt skal reduceres med over 1,5 pct. pr år.
 - Bygningsreglementets renoveringsklasser skal aktiveres og anvendes i forhold til minimumskrav, tilskud m.v.
 - Solceller, varmepumper og anden forsyning må ikke tælle med som forbedringer i klimaskærmen.
 - BR skal – adskilt fra kravene til klimaskærmen – stille krav til effektiviteten af varmeforsyningen, som sikrer udfasning af olie og gas og fremmer fjernvarme og varmepumper. Kravene til forsyningen skal også sikre, at bygningerne spiller godt sammen med varmeforsyningen. Den "energieffektive bygning" bør have fokus på god afkøling mod lavtemperatur varmeforsyning (55 C frem/25 C retur), hvilket giver bedre mulighed for at bruge fjernvarme og varmepumper effektivt.
 - Energimærket for bygninger skal digitaliseres og indeholde specifikke data for energiforbrug og indeklima, samtidig med, at det skal gøres tilgængeligt for håndværkere, energikonsulenter og energiforsyningselskaber, så de kan give god rådgivning af bygningsejere i forhold til energibesparelser.
 - Både bygningens energiforbrug, bedre afkøling og lavtemperatur varmeforsyning hænger sammen med beboernes adfærd. Der er brug for at det aktuelle energiforbrug er kendt, og at der er samspil mellem forbrug og forsyning "smart buildings". Desuden er adfærden afgørende for energiforbruget i det daglige, da undersøgelser viser, at der kan være stor forskel i energiforbrug blandt beboere med helt identiske boliger. Teknisk gode energibesparelser kan gå tabt i uhenigtsmæssig adfærd. Derfor skal BR have fokus på, at beboere er opmærksomme

på deres indeklima og energiforbrug i boligen, evt. via apps eller smart meters. Desuden kan man overveje årlige installationstjek fra forsyningsselskaberne baseret på data fra smart meters.

- Indsatser og virkemidler skal have særlig fokus på reduktion af varmekonsumet i bygninger fra før 1980. Man kan overveje gratis rådgivning til bygninger før 1980 samt i landområder. I IDAs klimasvar er der regnet med 12-15 pct. varmebesparelser i 2030 og 30-32 pct. i 2045. Det kræver en langt højere opmærksomhed på bygningernes energiforbrug i forbindelse med de løbende generelle renoveringer.
- CO₂-kravene for nye bygninger mv., som er fastsat i aftalen om den nationale strategi for bæredygtigt byggeri, bør indføres hurtigere og strammes. Det skal sikres, at kravene fremmer anvendelsen af træ og andre klimavenlige bygningsmaterialer og løsninger samt sikrer, at byggepladserne hurtigst mulige blive fossilfrie.
- Tilskud til energirådgivning i kombination med offentlig kaution for langfristede lavt forrentede energirenoveringslån samt retskrav her på 100 pct. variable tariffer (ingen fast del på fjernvarme). Kautionen skal også gælde for huse i landområderne og kan betinges af energirådgivning.
- Belønning af energirenoverede bygninger enten via reduceret ejendomsskat og/eller krav til opgradering ved salg. Energimærkning og oplysninger om energiforbrug til nye ejere ved salg er vigtige og bør fastholdes.
- Understøt renovering af almene boliger ved at fastholde Landsbyggefondens udvidede økonomiske ramme til renovering med krav om samtidig energirenovering.
- Der er brug for øget statslig og kommunal integreret energiplanlægning, hvor et særligt fokus på kort sigt er konvertering af kollektivt forsynede naturgasområder til kollektivt forsynede fjernvarmeområder. Den strategisk energiplanlægning skal inkludere udlægning til fjernvarmeområder og fremme etablering af nye net. Den skal have fokus på at understøtte energibesparelser og reducere arealmæssige barrierer for geotermi, store varmepumper, store varmelagre ved kommunal prioritering af arealer til nye energianlæg, særligt ved udvikling af nye byområder.
- Der er allerede fjernet mange barrierer for udnyttelse af overskudsvarme fra industri og datacentre mv., samt for store varmepumper i fjernvarmeområder. For store varmepumper er der dog stadig en række barrierer, der kan og bør mindskes ved at justere på følgende administrative forhold:

- Ved etablering af varmepumper i centrale fjernvarmeområder må man nu fravige kraftvarmekravet, men skal regne på konsekvenserne for det samlede fjernvarmesystem. Dette kan være en stor administrativ barriere for disse varmepumper, særligt for mindre organisationer, som ikke har ressourcer og informationer til at regne på konsekvenserne i centrale og mere komplekse fjernvarmeområder. Der bør ses på mulighederne for lettere og mere ensartet adgang fx ved etablering af standarder for tilkobling af mindre enheder.
- Ved ansøgninger om store luft til vand-varmepumper kan der være vanskeligheder med at få de nødvendige godkendelser pga. frygt for støj. Desuden kan der for store havvandsvarmepumper være udfordringer mht. frygt for nedkøling. Disse forhold administreres i dag ikke ensartet fra kommune til kommune. Der bør ses på harmonisering og forsimplicering af reglerne. Regler og krav til elnettilslutning for store varmepumper bør være mere gennemskuelige og forudsigelige på tværs af alle elnetselskaber, fx mht. begrænset netadgang og THD-krav, da det kan blive en betydelig usikkerhed i forbindelse med investering. Desuden bør forberedes for, at store varmepumper kan indgå med netstabiliserende egenskaber og i lokale elmarkeder.
- Forbud mod installation af nye olie- og gasfyr fra 2021-22, evt. med dispensationsmulighed, hvis der er lavet en kontrakt om tilslutning af fjernvarme. Forbud mod brug af olie- og gasfyr fra 2029.
- Justering af de samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger, så de indeholder en højere eksternalitetsomkostning for CO₂ i tråd med Klimaloven.

5.7 Samfundsøkonomi og varme

Varmesektorens tiltag kræver betydelige investeringer. De største er vist i tabellen herunder. Omkostningerne til vindkraft er regnet ud fra den andel, der svarer til det samlede el-behov til individuelle og store varmepumper.

Tabel 2. Investeringer i varmesektoren i hovedtal

	Investeringsbehov	Årlige afskrivning og rente i 2030
	Milliarder DKK	Millioner DKK/år
Bygningsrenovering	123,9	5.360
Individuelle varmepumper	70,3	5.114
Fjernvarmeudvidelser og 4G fjernvarme	29,6	1.467
Vindmøller	15,6	829
Store varmepumper	8,7	499
Geotermi	8,3	440
Solvarme, overskudsvarme og varmelagre	3,4	176
Sum	260	13.885

De fleste investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog undtagen:

- Investeringerne til energirenovering er sat til 124 mia. kr. frem til 2030 og herefter yderligere 186 mia. kr. frem til 2045. Dette er baseret på projekt om IDAs Energivision (Mathiesen *et al.*, 2015) samt analyser lavet i forbindelse med net zero buildings projektet (NZEB) (Henrik Lund *et al.*, 2014). Her er omkostninger øget med 20 pct. for at tage højde for dels en fremskynding og dels en vis rebound-effekt.
- Investeringer i 4.G fjernvarme er fundet med udgangspunkt i resultaterne af 4DH projektet (Lund *et al.*, 2018). Her regnes det med at halvdelen af fjernvarmen er omlagt til 4G fjernvarme i 2030 og resten i 2045. Det giver en investering på 4,9 mia. kroner i begge perioder.
- Investeringer i fjernvarmeudvidelser er fundet i varmeplan Danmark (Dyrelund *et al.*, 2008). Her regnes det med at omkostning fra et nettovarmebehov på 27,9 MWh/år til 37,6 MWh/år (63 pct.) på 33 mia.kr. i 2006 priser, svarende til 40 mia. kr. i 2020-priser. Da en del af denne omlægning allerede er sket, regnes der med, at der i perioden 2020-2030 samlet skal investeres 20 mia. kroner i udvidelse af fjernvarmenettet. Hertil kommer, at der skal investeres i nye fjernvarmeanheder til bygninger, der skal tilsluttes fjernvarme. Baseret på Energistyrelsens teknologikatalog vil disse enheder samlet have en investering på 4.7 mia. kr. frem til 2030 og yderligere 2,3 mia. kr. frem til 2045 til tilslutning af nybyggeri.

For at estimere effekten af varmetiltagene sammenlignes IDAs Klimasvar med en referencesituation, hvor tiltagene ikke gennemføres, men hvor varmebehovet stiger som forudsat frem til 2030. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 3. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer. Dog spares der også på investeringer til fx individuelle olie- og gasfyr, der ikke er behov for i IDAs Klimasvar.

Både for varmesektoren og de øvrige sektorer omtalt i de næste kapitler gælder, at den sektorvise sammenligning kun er foretaget frem til 2030. Sammenligningen efter 2030 frem til 2045 er kun gjort for den samlede IDA Klimasvar 2045-plan. Her er der i 2045 sammenlignet med en reference baseret på, at der ikke foretages yderligere tiltag efter 2030.

Tabel 3. Hovedtal for varmesektoren sammenlignet med en reference, hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAS Klimasvar	IDAS Klimasvar uden varmetiltag	Difference
	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>
Brændsel	25.058	35.865	-10.808
Elbalance	83	53	30
Variable drift og vedligehold	315	398	-83
Fast drift og vedligehold	27.368	28.103	-735
Investering	110.085	98.903	11.183
Sum	162.908	163.320	-413
	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>
CO ₂ -emission	11,52	14,52	-3,00
Gennemsnitlig CO ₂ -reduktionsomkostning	DKK/ton CO ₂		-138

Varmesektorens CO₂-emission er udregnet til 2,9 Mt i 2020. I referencen ville emissionen stige til 3,6 Mt. I IDAs Klimasvar reduceres CO₂-emissionen med 3,0 Mt til 0,6 Mt i 2030. Den resterende CO₂-emission på 0,6 Mt hidrører primært fra, at kraftvarmeværker og fjernvarmekedler delvist fyres med naturgas.

CO₂-reduktionsomkostningen for varme lander på -138 kr./t CO₂ (tabel 3). Det skal dog fremhæves, at dette tal er udregnet med **stor usikkerhed**. De samfundsøkonomiske omkostninger til investeringer øges med lidt over 11 milliarder kr., som opvejes af en tilsvarende besparelse på brændsler og drift og vedligeholdelse. Resultatet er en mindre besparelse på 413 millioner kr., men i sagens natur skal der kun ændres ganske lidt ved forudsætningerne, før dette tal bliver en udgift i samme størrelsesorden.

Størrelsen af CO₂-reduktionen samt selve det forhold, at investeringerne nogenlunde opvejes af besparelserne, vurderes at være robust. Men om man lander på 0 eller et lille plus eller minus er meget usikkert. Derfor skal CO₂-reduktionsomkostningstallet tages med store forbehold.

6 Industri

Industri omfatter industri, service og erhverv samt Nordsøen. Desuden er den forventede vækst i elforbruget til datacentre også medtaget under dette punkt.

For Nordsøen regnes der jf. basisfremskrivning 2019 (Energistyrelsen, 2019b) med et naturgasforbrug på 4 TWh i 2020 stigende til 5 TWh i 2030 ekskl. flagring, som jf. CO₂-emissionsafsnittet er medtaget under industrielle processer. De 5 TWh er naturgas anvendt i gasturbiner på Nordsøen til dækning af egetforbrug på boreplatformene (Energistyrelsen, 2019c).

For industri samt service og erhverv (i det følgende kaldet industri) er der taget udgangspunkt i IDAs Energivision fra 2015. Heri er industriens samlede energiforbrug opgjort til 194 PJ (54 TWh) i 2015 med en forventet vækst i referencefremskrivningen til 274 PJ (75 TWh) i 2050. I det følgende er dette forslag tilpasset 2030, hvor der regnes med et referenceenergiforbrug på 199 PJ, samt 2045, hvor der regnes med 229 PJ. Disse tal indeholder i udgangspunktet et elforbrug, som er medtaget som en del af det "klassiske elforbrug" under elsektoren. Ændringerne i elforbruget som følge af hhv. energieffektiviseringer og elektrificering er dog behandlet her som en del af industrisektoren.

IDAs forslag omfatter formuleringen af følgende prioriterings hierarki fra IDAs Energivision

1. Besparelser.
2. Forsyning fra fjernvarme og fjernkøling til industri samt bidrag af overskudsvarme den anden vej.
3. Varmepumper til at dække resterende lavtemperatur forbrug.
4. Erstatte fossile brændsler med el.
5. Erstatte fossile brændsler med fast biomasse.
6. Erstatte fossile brændsler med biogas.

Hertil kommer et øget elforbrug til nye store datacentre på forventet 7 TWh i 2030 og 10 TWh i 2045, hvoraf en væsentlig del går til køling af datacentrene. Nye og planlagte datacentre udgør et meget stort potentiale for fjernvarme, hvis overskudsvarmen kan udnyttes. Hvis fx blot halvdelen (3,5 TWh i 2030) kan udnyttes, svarer det til at kunne dække i størrelsesordenen 10 pct. af det nuværende fjernvarmebehov. Da der ikke kun bygges datacentre i Danmark, men mange andre steder i Europa og i resten af verden vurderes det, at en bedre afkølingsteknologi, som kan muliggøre udnyttelsen af overskudsvarmen til fjernvarme, har et meget stort eksportpotentiale. Samtidig vil det kunne skubbe på udvikling af fjernvarme andre steder i Europa og dermed også en væsentlig parameter i eksport af dansk fjernvarme-teknologi.

6.1 Energieffektivitet og industri

Under henvisning til rapporten *Kortlægning af energibesparelser i erhvervslivet* (Kromann, Kragerup & Dalsgaard, 2015) foreslås i 2045 gennemført de besparelser, der har en tilbagebetalingstid under 10 år svarende til en reduktion på 32 pct. i energiforbruget eksklusiv transport. I 2030 forudsættes disse besparelser delvist gennemført, dvs. besparelser svarende til 24 PJ eller ca. 12 pct.

Yderligere foreslår IDA at sætte fokus på datacentrenes køling, som her er indregnet som dels en besparelse på elforbruget på 5 pct. og dels under sektorintegration som et overskudsvarmepotentiale på 3,5 TWh i 2030 og 5 TWh i 2045.

Konkrete forslag

- Besparelser og effektiviseringer på 12% i 2030 (24 PJ inkl. effektiviseringer i el, varmepumper, fjernvarme og fjernkøling) stigende til 32% i 2045.
- Besparelser i datacentre (5 pct. af el).

6.2 Sektorintegration og industri

I IDAs Energivision fra 2015 vurderes der at være et potentiale for øget fjernvarmeforsyning af industrien på 12 PJ i 2050. I klimasvaret foreslås 7 PJ implementeret i 2030. Hertil kommer et fjernkølingspotentiale (5 PJ), hvor 3 PJ foreslås implementeret i 2030. Endelig er der et potentiale på 7 PJ, hvor rumvarme kan forsynes med en varmepumpe, og hvoraf IDAs Klimasvar realiserer halvdelen i 2030 og resten i 2045.

Når disse omlægninger er gennemført, er der til rest i industrien et forventet forbrug af fossile brændsler på 64 PJ i 2030. I IDAs Energivision fra 2015 erstattes disse med el, fast biomasse og biogas i 2050 og delvist implementeret i 2030. Her i IDAs Klimasvar er implementeringen fremrykket for at kunne opnå 70 pct. reduktionen allerede i 2030, således at andelen af kul, olie og naturgas i væsentligt omfang er erstattet med elektrificering, biomasse og biogas i 2030. Den overordnede gasinfrastruktur med gasnet og lagre har fortsat en vigtig rolle at spille, men nu med kapacitet og backup for el og fjernvarme samt som distributør af naturgas og biogas til procesformål og transport.

Tabel 4. Industrien i IDAs Klimasvar sammenlignet med IDAs Energivision

IDAs Energivision 2050 (2015) *					IDAs klimasvar (2020)				
						Approksimation		Fremskyndet	
TWh/år	2015	2020	2035	2050	2030	2045	2030	2045	
Kul	1,5	1,3	0,6		0,8	0,2	0,4		
Olie	11,2	9,6	4,8		6,4	1,6	1,4		
Naturgas	10,8	9,3	4,6		6,2	1,5	2,1		
Biomasse	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	6,3	3,4	
Biogas	0	0,5	1,9	3,4	1,4	2,9	2,1	3,4	
Sum Brændsler	26,8	24	15,3	6,8	18,2	9,6	12,3	6,8	
El	20,3	20,8	22,3	23,8	21,8	23,3	25,7	23,8	
Fjernvarme	0	0,5	2	3,4	1,5	2,9	2,0	3,4	
Fjernkøling	0	0,2	0,8	1,3	0,6	1,1	0,8	1,3	
Sum (TWh/år)	47,1	45,5	40,4	35,3	42,1	37,0	40,8	35,3	
Sum (PJ/år)	169,6	163,8	145,4	127,1	151,6	133,2	146,8	127,1	

Kilde: *Fra tabel 34, side 100 i IDAs Energivision 2050.

Note: Fremskyndet 2030: Fjernvarme øges og erstatter Ngas med faktor 1/0,9, fjernkøling erstatter el med faktor 2. 0,4 TWh kul erstattes med biomasse, og 5 TWh olie med el og biomasse. Ngas delvist med elektrificering og ved erstatning med el indregnes en effektivisering på 20 pct. Fordelingen mellem biogas og naturgas afspejler fordelingen i det samlede energisystem.

De konkrete tal fremgår af tabel 4 og er baseret på IDAs Energivision fra 2015 side 100, hvor resultaterne er angivet for årene 2015, 2020, 2035 og 2050. Heraf er tilsvarende tal fundet for 2030 og 2045 ved approksimation. Realiseringen af den tidligere omlægning i 2050 regnes fremskyndet til 2045, og dele af denne udvikling regnes fremskyndet til 2030 på følgende måde: Ift. IDAs Energivision erstattes 0,4 TWh kul med fast biomasse, og 5 TWh olie med hhv. 2,5 TWh biomasse og 2 TWh el (idet der forudsættes en effektivitetsfordel på 20 pct. ved omlægning til el). Tilsvarende for naturgas, hvor 6,2 TWh først reduceres med 0,5 TWh fjernvarme, hvorefter halvdelen af den resterende mængde omlægges til 2,28 TWh el. Den resterende mængde gas på 2,8 TWh erstattes delvist af biogas, som forklaret herunder. Hertil kommer, at 0,2 TWh fjernkøling erstatter 0,4 TWh el.

Omlægningen ender med et forbrug af naturgas eller biogas i industrien på i alt 15 PJ (4,2 TWh). Det flugter med, at klimapartnerskabet for tung industri (Thomsen, 2020) kommer frem til, at "*Energiintensiv industri har brug for 14 PJ biogas i 2030 til processer, der ikke kan elektrificeres*". Gasforbruget på de 4,2 TWh er fordelt mellem biogas og naturgas, så det afspejler fordelingen i det samlede system, dvs. ca. halvt af hver.

I Nordsøen foreslås det, at det forventede eget forbrug af naturgas til drift af platformene i 2030 delvist erstattes med offshore vind. Der er regnet med udgangspunkt i en effektivitet på de nuværende værker på 30 pct. svarende til, at 5 GWh naturgas kan erstattes med 1,5 TWh el. Der er lavet time-simuleringer af to alternativer:

1. I det ene alternativ anlægges en 300 MW offshore vindmøllepark, som vil kunne producere 1,45 TWh el. Heraf vil 1,06 TWh kunne erstatte el og naturgas, og resten vil ikke have et tidsmæssigt sammenfald med forbruget.
2. I det andet alternativ anlægges 400 MW vind plus 200 MW elektrolyse/FC + 40 GWh brint-lager. Dette alternativ vil kunne erstatte 1,4 TWh.

Konkrete tiltag

- Omlægning til fjernvarme (7 PJ i 2030 og 12 PJ i 2045).
- Fjernkøling med kølelagre (3 PJ i 2030 og 5 PJ i 2045).
- Varmepumper for resterende rumvarmebehov (3,5 PJ i 2030 og 7 PJ i 2045).
- El erstatter fossil (17 PJ inkl. varmepumper).
- 300 MW offshore vind erstatter 3,5 PJ-naturgas på boreplatformene.

6.3 Biomasse og industri

Som nævnt ovenfor under sektorintegration erstattes en del af det eksisterende forbrug af fossile brændsler med biomasse og biogas.

Konkrete tiltag

- 23 PJ Biomasse i 2030 og 12 PJ i 2045 erstatter fossile brændsler.
- 8 PJ Biogas i 2030 og 12 PJ i 2045 erstatter fossile brændsler.

6.4 Vedvarende energi og industri

Generelt foreslås der en grøn industrisektor. Det betyder, at der bør etableres vindkraft svarende til elforbruget af elektrificeringen, og at der bør etableres vindkraft til erstatning af naturgas i Nordsøen. Det viser sig dog, at effektiviseringen i elbehovet i industrien modsvarer den øgede elektrificering, hvorfor der kun etables nye vindmøller til boreplatforme.

Konkrete tiltag

- 300 MW vind til boreplatforme i 2030.

6.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af industrisektoren

De største udfordringer og dermed de største behov for forskning og udvikling forventes at være i forbindelse storskalaudnyttelsen af følgende teknologier:

- Integration af datacentre i fjernvarmesystemet.
- Produktionsomlægninger i industrien til el, biomasse og biogas.

6.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af industrisektoren

- En ny forretningsmodel for energieffektivisering og elektrificering af industrien er nødvendig. Der er delvist planlagt en afgiftsreform, der fremmer elektrificering på bekostning af brændsler. Dette skal kombineres med en CO₂-afgift oveni. Ændrede eltariffer og gastariffer kan fremme fleksibelt forbrug, hvilket hjælper integrationen af vedvarende energi. Forretningsmodellen skal fremme, at den mere effektive, men investeringstunge, energieffektivisering og elektrificering kan finansieres. I dag vil virksomheder hellere have lave up-front investeringsomkostninger og højere driftsomkostninger (fx biogas forbrug). Et samarbejde mellem stat, industri og danske pensionselskaber kan evt. løse denne problemstilling, og gradvist ændre investeringsmønstrene over mod højere investeringsomkostninger og mod lave, stabile driftsomkostninger.
- Det er vigtigt at overskudsvarme fra datacentre indgår i fjernvarmen, derfor bør det sikres, at der udpeges velegnede arealer til datacentre, hvor datakapacitet el og varmeudnyttelse er planlagt nøje. Dette vil sammen med fjernelse af barriere for udnyttelse af overskudsvarmen for datacentre sikre, at vi kan bruge overskudsvarmen i det danske energisystem.
- Forsknings-, udviklings- og demonstrationsindsats, som skal udvikle alternativer inden for de anvendelsesområder i erhvervene, hvor de fossile energikilder ikke med dagens teknologi kan erstattes af varmepumper. Det gælder fx høj-temperaturprocesser, direkte fyring og tung transport, hvor der i dag anvendes dieselmotorer (traktorer, entreprenørmaskiner, fiskekuttere mv.).
- Målrettet rådgivning til industrien om konvertering/omstilling fra fossile brændsler til elektrificering og grønne brændsler – rådgivning fx rejsehold – som en del af offentlig energispare ordninger.
- Fastholde de nuværende økonomiske midler til energirådgivning suppleret med tilskud, der reducerer tilbagebetalingstider. Tilskud kan evt. finansieres via el- og CO₂-afgifter på industrien. CO₂-afgift på naturgas på Nordsøen til fremme af energieffektivitet og vedvarende energi.

6.7 Samfundsøkonomi og industri

Industriktorens tiltag kræver betydelige investeringer. De største er vist i tabellen herunder. Omkostningerne til vindkraft er regnet ud fra den andel, der svarer til det samlede el-behov til elektrificering minus el-besparelser.

Tabel 5. Investeringer i industriktoren i hovedtal

	Investeringsbehov	Årlige afskrivning og rente i 2030
	Milliarder DKK	Millioner DKK/år
El-besparelser	13,0	1.089
Brændselsbesparelser	15,0	1.008
Nordsøen	0,2	14
Elektrificering	6,0	345
Erstatning af biomasse med olie	2,0	115
Fjernkøling	1,6	89
Gasnet	1,5	89
Sum	39,3	2.748

De fleste investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog undtagen:

- Investeringerne i **el-besparelser** er foretaget med udgangspunkt i IDAs Energivision, som bygger på rapporten *Kortlægning af energibesparelser i erhvervslivet* (Kromann, Kragerup & Dalsgaard, 2015): El-besparelser med en tilbagebetalingstid under 10 år er i 2015 vurderet til en omkostning på 2500 mio. kr. pr. TWh sparet. (336 million EUR/TWh) med en gennemsnitlig levetid på 15 år. Denne pris er skrevet op til dagens priser, skønsmæssigt forhøjet som følge af fremskydning og rundet af til 3000 mio. kr. pr. TWh sparet. (400 million EUR/TWh). Den fulde besparelse på 8,8 TWh i 2050 svarende til en investering på 26 mia.kr. forudsættes fremrykket til 2045, og heraf forudsættes 4,4 realiseret i 2030 svarende til en investering på 13 mia. kr.
- Investeringerne i **brændselsbesparelser** er foretaget med udgangspunkt i de samme rapporter: Brændselsbesparelser med en tilbagebetalingstid under 10 år er i 2015 vurderet til en omkostning på 6500 mio. kr. pr. TWh sparet. (870 million EUR/TWh) med en gennemsnitlig levetid på 20 år. Denne pris er skrevet op til dagens priser, skønsmæssigt forhøjet som følge af fremskydning og rundet af til 7500 mio. kr. pr. TWh sparet. (1000 million EUR/TWh). Den fulde besparelse på 4 TWh 2050 svarende til en investering på 30 mia. kr. forudsættes fremrykket til 2045 og heraf forudsættes 2 realiseret i 2030 svarende til en investering på 15 mia.kr.
- Omkostninger til **fjernvarmeudvidelser** er inkluderet under varmesektoren. Selve tilslutningen til fjernvarme samt varmepumper er forudsat omkostningsneutral, idet der spares kedler og lignende. Varmepumper er lidt dyrere end kedler, men fjernvarmeunits er tilsvarende lidt billigere.

- Investeringerne i **elektrificering** ("El erstatter olie (2,5 TWh) og naturgas (2,9 TWh)") svarende til en CO₂-emission på 1,25 Mt er opgjort med udgangspunkt i klimapartnerskabet for tung industri (Michael Lundgaard Thomsen, 2020). Heri angives investeringen i en elektrificering med en CO₂-fortrængning på 0,1 Mt CO₂ til 0,5 mia.kr. Der regnes således her med en omkostning på 6 mia. kr. Levetiden er sat til 25 år.
- Iflg. klimapartnerskabet for tung industri kan *"Skift fra kul og petrokoks til alternative brændsler (biomasse og affald) ... reducere 0,4 mio. tons CO₂ i 2030, samt have en økonomisk positiv fortrængningsomkostning."* Omkostningen til at **erstatte kul med biomasse** (0,4 TWh) er her således alene indregnet som den øgede samfundsøkonomiske omkostning, der er til biomassen. Mht. **biomasse der erstatter olie** (2,5 TWh), er der indregnet en investering på det halve af elektrificeringen og afrundet til 2 mia.kr. Levetiden er sat til 25 år. Den samfundsøkonomiske brændselsomkostning incl. håndtering er stort set den samme for fuelolie som for biomasse.
- **Biogas erstatter naturgas** (2,1 TWh). Dette kræver ikke øgede investeringsomkostninger i industrien. Omkostningerne til biogas medtages andetsteds.
- **Udvidelse af gasnettet**. For at kunne erstatte olie og kul i industrien med naturgas og biogas vil det være nødvendigt at foretage en vis udvidelse af gasnettet og/eller supplere med lokale biogasnet. I klimapartnerskabet for energitung industri (Michael Lundgaard Thomsen, 2020) er en sådan omkostning vurderet til 1-1,5 milliarder kr. Der er her medtaget en omkostning på 1,5 milliarder kroner med en levetid på 40 år.

For at estimere effekten af omlægningerne i industrisektoren, sammenlignes IDAs Klimasvar med en referencesituation, hvor tiltagene ikke gennemføres. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 5. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer.



Tabel 6. Hovedtal for industrisektoren 2030 sammenlignet med en reference, hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs Klimasvar	IDAs Klimasvar uden industritiltag	Difference
	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>
Brændsel	25.058	27.750	-2.693
Elbalance	83	90	-8
Variable drift og vedligehold	315	315	0
Fast drift og vedligehold	27.368	27.225	113
Investering	110.085	107.108	2.978
Sum	162.908	162.518	390
	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>
CO ₂ -emission	11,52	14,84	-3,33
Gennemsnitlig CO ₂ Reduktionsomkostning		DKK/ton CO ₂	117

Industrisektorens energirelaterede CO₂-emission er udregnet til 7,8 Mt i 2020. I referencen ville emissionen falde til 5,7 Mt. I IDAs Klimasvar reduceres CO₂-emissionen med 3,3 Mt til 2,4 Mt i 2030.

CO₂-reduktionsomkostningen for industri (tabel 6) lander på 117 kr./t CO₂. Det skal dog fremhæves, at dette tal er udregnet med stor usikkerhed. De samfundsøkonomiske omkostninger til investeringer øges med knap 3 milliarder kr., som opvejes af en besparelse på brændsler og drift og vedligeholdelse i samme størrelsesorden.

Resultatet er en stigning i de årlige omkostninger på 390 millioner kr., men tilsvarende som for varmesektoren skal der kun ændres lidt ved forudsætningerne før dette tal ændres meget. Det skal også bemærkes, at omkostningerne til biogas ikke er medtaget under industri, men under el-sektoren.

Størrelsen af CO₂-reduktionen samt selve det forhold, at investeringerne nogenlunde opvejes af besparelserne, vurderes at være robust. Om man lander på 0 eller et lille plus eller minus er i sagens natur meget usikkert. Derfor skal CO₂-reduktionsomkostningstallet tages med store forbehold.

7 Transport

Transport står for næsten en tredjedel af udledninger af drivhusgasserne i Danmark og for næsten halvdelen af udledningerne i energisektoren. Det samlede transportenergibehov forventes i Basisfremskrivningen at være 179 PJ i 2030 foruden international luft- og skibstransport. I Energistyrelsens basisfremskrivning (Energistyrelsen, 2019b) forventes en kraftig stigning i mobilitetsbehovet frem mod 2030 svarende til en stigning fra i dag cirka 2,5 mio. biler til 3,3 mio. biler i 2030. En mindre del af væksten modsvares af forventning til mere effektive biler og fly. Når transportens CO₂-emission opgøres efter FN-metoden, er international fly- og skibstransport ikke medregnet. IDAs Klimasvar medtager således ikke disse dele af sektoren i opfyldelsen af målsætning for 2030, men de indgår i 2045-scenariet.

7.1 Energieffektivitet og transport

IDAs Klimasvar foreslår fortsat mere vejtransport, men også at der kommer fokus på at dæmpe væksten i især personbiltransporten. IDAs Klimasvar peger således på, dels indførelse af roadpricing mhp. at omlægge dele af afgifterne væk fra registrerings- og vægtafgifter og over på kørselsafgifter evt. med forskellige priser i forskellige zoner, dels en gradvis indførelse af zoner i de større byområder, hvor der kun må bruges elkøretøjer. Disse to virkemidler har sigte på en samtidig opfyldelse af følgende fire mål:

- at afdæmpe væksten i personbil-km, selvom der er flere køretøjer end i dag,
- at fremme overgangen til elkøretøjer,
- at fremme omlægning til kollektiv trafik, og
- at mindske forurening og trængsel i de større byområder, uden at tabe mobilitet i landområderne.

Roadpricing kan gennemføres på mange måder, men her foreslås det at starte med et simpelt princip, som er frivilligt og henvender sig til nye bilejere. Man kan tilskynde til registrering/selvangivelse af kørte km med modregning i registreringsafgift og vægtafgift, som også benyttet af forsikringsselskaber. GPS er allerede standard i mange biler, og kan danne grundlag for frivillig overgang til realtids roadpricing, hvor der kan differentieres i tid og sted. Gradvist kan roadpricing indføres på denne måde med lave omkostninger. Da det er frivilligt, men for de fleste økonomisk attraktivt at betale bilskatter i form af roadpricing, undgår man en lang række af de kontrol- og datasikkerhedsproblemer, som hidtidige forslag har været 'belastet' økonomisk af.

En transportsektor der er dækket af 100 pct. vedvarende energi i 2045 kræver, at vi allerede nu har fokus på, at investeringer i infrastruktur underbygger mobilitet og vedvarende energi. IDAs Klimasvar foreslår, at de første skridt tages inden 2030, hvilket blandt andet betyder en lidt mindre vækst i udgifter til nye veje, og lidt flere investeringer i kollektiv transport og supplerende midler til cyklisme. Som princip bør man arbejde med, at væksten i mobilitet sker på mere effektive transportformer som tog, metro, letbaner, busser, e-roads, cyklisme mv., og at væksten i vejtransporten og lufttransporten dæmpes. Det betyder ikke, at vi nødvendigvis skal transportere os mindre i fly, lastbil og personbil end nu, men at væksten dæmpes, så vi ikke transporterer os 50% flere km i 2045 end nu.

IDAs Klimasvar forslår at afdæmpe væksten i international flytransport, så brændstofforbruget er 10 pct. lavere end i basisfremskrivningen i 2030. Dette kan opnås med en kombination af en brændsels- og passagerafgift, men det kræver, at Danmark går i dialog med andre lande om tiltag. Det kan være nødvendigt, at EU eller en gruppe af lande i EU går foran på området. IDAs Klimasvar arbejder ikke med færre rejser end i dag, men med en lavere vækst. Samlet set bruges derfor omtrent den samme mængde brændsel som i dag til international transport. Fra 2030 til 2045 foreslår IDAs Klimasvar at omlægge 17 pct. af antal personkm fra international flytransport til tog. Nationalt foreslår IDAs Klimasvar at 95 pct. af al passagerflytransport, bortset fra ture til og fra Bornholm, erstattes af tog og anden offentlig transport.

Konkrete forslag

- Afdæmpning af vækst i personbil-km ift. vækst i basisfremskrivningen (1,6 pct./år i stedet for 2 pct./år), men stadig flere køretøjer end i dag.
- Omlægning af personkm fra biltransport (2 pct.) og fly (10 pct.) til tog og kollektiv trafik nationalt i 2030. I 2045 omlægges yderligere personkm fra biltransport (25 pct.) og fly (87 pct.) til tog og kollektiv trafik nationalt.
- Omlægning af personkm fra biltransport (2 pct.) til cykler i 2030. Yderligere personkm fra biltransport (5 pct.) omlægges til cykler i perioden mod 2045.
- Omlægning af personkm fra international flytransport (17 pct.) til international tog-transport i 2045.
- Afdæmpe væksten i brændselsforbrug med 10 pct. i national og internationale fly.

7.2 Sektorintegration og transport

En afgørende faktor i IDAs Klimasvar er at begrænse brugen af benzin og diesel til biler, så det reduceres fra 102 PJ i 2020 til 59 PJ i 2030. Afhængigt af hvor meget den enkelte bil kører, svarer det til, at antallet af benzin- og dieslbiler skal reduceres fra nu 2,6 til 1,5-2 millioner biler i 2030. Det er ikke antallet af biler, der er afgørende for de danske udledninger. Det er, hvor meget der køres i bilerne, og dermed hvor stor CO₂-belastningen bliver.

Afhængigt af hvor meget transportarbejdet stiger, og hvor meget der køres i den enkelte bil, vil resten af personbilstransporten kræve en betydelig stigning i antallet af elbiler. Med udgangspunkt i de nævnte tiltag til at begrænse væksten er antallet af elbiler udregnet på følgende måde:

I Basisfremskrivningen 2019 forventes en væsentlig stigning i biler til 3.3 mio. i 2030, hvoraf cirka 300.000 forventes at være elbiler eller plug-in-hybridbiler. IDAs Klimasvar foreslår yderligere 1 mio. el- og plug-in hybridbiler således, at der i 2030 er 1.3 mio. el- og plug-in hybridbiler ud af 3,3 millioner biler. Størrelsen på bilparken forventes at forblive stabilt på det niveau frem mod 2045, hvor alle benzin- og dieslbiler er udskiftet med rene elbiler. Den høje energieffektivitet og den hurtige udvikling inden for batteriteknologi vil øjensynligt medvirke til en naturlig udskiftning af benzin- og dieselskøretøjer både i persontransporten såvel som godstransporten. Plug-in hybridbiler forventes at være en overgangsteknologi, som vil blive udfaset, og også bør udfases.

IDAs Klimasvar kan realiseres enten ved, at der er færre biler, eller ved at det samme antal biler kører mindre. Energiforbruget er det samme. Investeringsomkostningen er imidlertid forskellig, og her er omkostningerne opgjort på den sikre side ved at regne med, at der skal betales for 3,3 mio. biler i alle scenarier.

I perioden frem til 2030 betyder det en ekstra investeringsomkostning i 1,3 mio. el- og hybridbiler. Hertil kommer omkostninger til elektrificering af busser og lastbiler inkl. en vis udbygning med e-roads. I alt er ekstrainvesteringen opgjort til 73 mia. kr. frem til 2030.

I perioden 2030-2045 er den tilsvarende investering opgjort til 53 mia. kr. Investeringen er sammensat af ekstraomkostninger til 2 mio. elbiler på 42 mia. kr. og ekstraomkostninger til 18.000 busser og lastbiler på el og brint på tilsammen ca. 4 mia. kr. Hertil kommer 400 km e-roads opgjort til knap 7 mia. kr. Når investeringen efter 2030 er mindre end i perioden før 2030, skyldes det dels, at der er færre hybridbiler, og dels en forventning til at ekstraprisen på en elbil bliver mindre i takt med udviklingen i især batterier.

På infrastrukturomkostninger kræver IDAs Klimasvar en øget investering i jernbaner på 10 mia. kr. før 2030 og yderligere 170 mia. kr. efter 2030. Dette opvejes dog af tilsvarende mindre investeringer i motorvej. Frem til 2030 investeres der i ca. 300.000 ladestandere til en samlet omkostning på 3,1 mia. kr. og i perioden efter 2030 udbygges der yderligere med 550.000 ladestandere for 5,1 mia. kr.

Flere og flere virksomheder laver fuldt ud elektriske køretøjer til tung transport og specielle køretøjer. Det må forventes, at denne udvikling fortsætter. Konkret foreslås i IDAs Klimasvar, at 35 pct. af busserne og 30 pct. af varevognene samt 20 pct. af motorcyklerne og forsvarets brændselsforbrug er på el- eller plug-in hybrid i 2030. I 2045 foreslås, at 75 pct. af busserne og alle varevogne udskiftes med elkøretøjer. For de resterende 25 pct. af busserne foreslås det at udskifte de fossile brændsler i forbrændingsmotorerne med elektrofuels produceret via elektrolyse. 50 pct. af motorcykler og forsvarets brændselsforbrug estimeres muligt at elektrificere i 2045.

For lastbiler foreslås, at vi gradvist kommer op på mindst 5 pct. lastbiler på batteridrift, enten i form af el-lastbiler eller som plug-in hybrid. For lastbiler foreslås endvidere, at 5 pct. benytter e-roads i 2030. E-Roads er en tung infrastrukturinvestering, som kan vise sig at være en meget effektiv måde at få de fossile brændsler ud af den tunge transport, da energieffektiviteten er meget høj sammenlignet med både traditionelle 1. og 2. generations biobrændsler samt elektrofuels.

I 2045 foreslås, at 35 pct. af benzin- og diesellastbilerne (svarende til ca. 43 pct. af det nationale transportbehov) kommer på batteridrift. Fordelingen mellem batterilastbiler med store batterier, der ikke kan tilkobles e-road infrastruktur og batterilastbiler med mindre batterier, der modtager strøm i bevægelse fra e-road infrastruktur er usikker. Hvis udviklingen af batteriteknologi fortsætter i det samme tempo som observeret gennem det seneste årti, forventes det, at både små og store lastbiler kan opnå en lang rækkevidde uden en nævneværdig forøgelse af køretøjets vægt. En sådan udvikling vil mindske behovet for udbygning af e-roads. Hvis udvik-

lingen derimod ikke tillader, at tunge lastbiler kan køre længere strækninger uden hyppige opladningsstop, vil et netværk af e-roads, der gør det muligt at lade mens lastbilen er i bevægelse, være en oplagt løsning for at omstille den tunge transport til batteridrift.

35 pct. af lastbilerne foreslås at komme på batteridrift i 2045, hvilket svarer nogenlunde til en elektrificering af alle ture under 150 km. Med e-roads vil man kunne nå langt længere end 35%. I IDAs Klimasvar er medregnet en udgift til e-roads svarende til 1/3 af det, der skal til, for at man fuldstændigt ville kunne basere transporten på e-roads. Det antages, at et netværk af e-roads, der dækker hele det danske motorvejsnet (1,6% af det danske vejnet) vil være tilstrækkeligt for en fuldstændig elektrificering. Dvs. 400 km e-roads ud af et samlet behov på 1200 km ved fuld udbygning.

De resterende fossile brændsler i den tunge vejtransport foreslås i IDAs Klimasvar at udskiftes med hydrogen (10 pct.) og elektrofuels (55 pct.).

Det er en væsentlig udfordring at få omstillet den tunge transport. Biobrændsler og biomasse er en knap ressource, men elektrofuels kan afhjælpe presset på biobrændselsressourcen og på sigt også blive billigere end biobrændsler. I IDAs Klimasvar er der ingen traditionelle biobrændsler. For at nå i mål mht. 100 pct. vedvarende energi på længere sigt, er det afgørende, at vi er i gang med Power-to-X og elektrofuels i 2030. Produktion af elektrofuels kræver elektrolyse og vil resultere i et stort nyt elforbrug. Det er afgørende, at disse forbrug er fleksible og også, at disse anlæg så vidt muligt er placeret tæt på fluktuerende vedvarende energi. Elektrolyseanlæg skal derfor have en driftstid på 40-60 pct. afhængig af placering og kontekst.

Elektrofuels kræver en CO₂-kilde. I IDAs Klimasvar foreslås en kombination af CO₂ fra punktkilder som cementproduktion, biogas og andre kraftværker. Der anvendes ikke air-capture til CO₂-fangst grundet de forventede omkostninger og teknologiens modenhed, men dette kan være en vigtig teknologi mht. elektrofuels samt CO₂-behovet generelt frem mod 2045. Udover ovennævnte er der yderligere i IDAs Klimasvar indregnet en produktion af elektrofuels til international flytransport på 2 pct. i 2030. Dette initiativ er afgørende for at starte op og få erfaringer med denne type brændstofproduktion. Efter 2030 vil den skulle udbygges markant for at kunne dække en stor andel af international flytransport. Forventningerne omkring flytransport i IDAs Klimasvar er, at elektrofuels vil spille en stor rolle for at dekarbonisere sektoren i 2045. Forventningerne til alternative brændsler er mere konservative, men det foreslås i IDAs Klimasvar, at elektriske fly dækker 25 pct. af de kortere ruter inden for Europas grænser på under 1000 km, hvilket svarer til ca. 7 pct. af det samlede transportbehov. Samtidig foreslås det, at brintfly udnyttes til at dække 10 pct. af de længere internationale ruter over 1000 km, svarende ligeledes til ca. 7 pct. af det samlede transportbehov. Dette skal ses i lyset af den næsten totale omlægning af national flyvning og omlægninger i den internationale flytransport til tog.

Tilsvarende er produktionen af ammoniak til skibe (her indenlands) afgørende. Denne produktion vil også skulle udbygges markant efter 2030.

Konkrete tiltag

- Benzin og diesel til biler reduceres fra nu 102 PJ til 59 PJ svarende til at antallet reduceres fra 2,6 til 1,5 -2 millioner biler (afhængigt af hvor meget de kører) i 2030.
- 1,3 mio. el-biler eller plug-in-hybridbiler i 2030 og 3,3 mio. el-biler i 2045 (svarende til 100 pct. af personbilparken).
- 35 pct. af busser og 30 pct. af varevogne på batteridrift eller plug-in-hybrid i 2030. 75 pct. af busser og 100 pct. af varevogne på batteridrift eller plug-in-hybrid i 2045.
- 20 pct. af brændselsforbruget i motorcykler og i forsvaret på el i 2030 og 50% i 2045.
- 5 pct. lastbiler på batteridrift eller plug-in-hybrid og 5% e-roads i 2030 stigende til 35% i 2045.
- 5 pct. af lastbiler direkte el i 2030 (e-roads)
- 20 pct. elektrofuels (DME/metanol) til lastbiler og varevogne (9,8 PJ) i 2030. 10 pct. brint og 55 pct. elektrofuels til lastbiler i 2045.
- 10 pct. elektrofuels (ammoniak) til skibe i 2030 (0,6 PJ). Al indenrigs og 10 pct. af udenrigs færgetransport på el i 2045. Det resterende brændselsforbrug dækkes af ammoniak og elektrofuels.
- 2 pct. elektrofuels (jetfuel) til nationale fly (0,3 PJ) i 2030. I 2045 dækkes i alt 14 pct. af international flytransport af el og brint (el til kortere ture og brint til længere). Det resterende brændselsforbrug dækkes af elektrofuels.
- 1200 MW elektrolyse i 2030 og 4800 MW i 2045.
- CO₂-capture til elektrofuels fra en kombination af punktkilder.

7.3 Biomasse og transport

I IDAs Klimasvar anvendes forgasning af biomasse og CO₂-punktkilder til at fremstille elektrofuels. Dette kan evt. suppleres med Hydrothermal liquefaction (HTL).

Konkrete tiltag

- 200 MW forgasning af træflis i 2030 og ca. 2000 MW i 2045 fordelt på forgasning, HTL og Pyrolyse

7.4 Vedvarende energi og transport

Konkrete tiltag

- 2.700 MW off-shore vind i 2030 og 9750 MW i 2045 til el køretøjer samt elforbrug ved CO₂-capture og elektrolyse.

7.5 Teknologiske udfordringer i omstilling af transportsektoren

Transporten udgør en stor udfordring for at nå klimamålet i 2030, men måske en endnu større udfordring frem mod et 100 pct. vedvarende energimål. Det er derfor afgørende, at de teknologier, vi skal anvende fra 2030 allerede frem mod 2030 udvikles og modnes. For transport handler disse om:

- Storskala intelligent opladning af elkøretøjer.
- E-roads til lastbiler med delvis batteridrift.
- Fra simpel årlig roadpricing til avanceret GPS-baseret roadpricing.
- Elektrolyseanlæg med fleksibel drift (fuldlasttid på cirka 50 pct.), herunder mere effektiv elektrolyse (SOEC).
- Integrerede fleksible elektrofuels-produktioner med store brintlagre, Carbon Capture anlæg, CO₂-lagre og kemisk syntese (DME, Metanol, Ammoniak), herunder opskalering.
- Storskala forgasning af biomasse, pyrolyse og HTL.

I perioden efter 2030 frem mod 2045 forventes det, at mange af de samme teknologier skal tages i brug blot i større skala.

7.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af transportsektoren

- Der er derfor brug for en sammenhængende national mobilitetsplan, der skal styrke energieffektive transportformer som tog, metro, cykeltransport, gang mv.
- Indførelse af roadpricing med henblik på at omlægge (alle eller dele af) danske bilafgifter væk fra registrerings- og vægtafgifter over på kørselsafgifter med forskellige priser i forskellige zoner og på forskellige tidspunkter.
- Roadpricing foreslås indført. Eventuelt i første omgang frivilligt for nye bilejere, som en simpel årlig selvangivelse til en start med mulighed for også at benytte GPS i nyere biler. GPS muliggør differentiering mellem tid og sted. Gradvist udvides ordningen baseret på en økonomisk gulerod ved at skifte afgiftsmodel fra registrerings- og vægtafgifter. Som supplement kan overvejes en gradvis indfasning af ændringer i kørselsfradraget, som tilgodeser mobilitet i kollektiv transport og samkørselsordninger.
- Gradvist (tid og sted) indførelse af zoner i de større byområder, hvor der kun må bruges elkøretøjer.
- Sikre en grøn balance i nye infrastrukturinvesteringer mht. vej og kollektiv transport, så der anvendes flest midler til at øge mobilitet i energieffektive transportformer som tog, metro, cykelstier, fodgængere mv og færre midler til vejnettet.
- Supercykelstier skal udbredes, så der skabes et landsdækkende net af cykelstier imellem og på tværs af kommuner. Der er mange ture på landet i den mellemlange distance på 4-20 km, som med fordel kan tages på en el-cykel, hvis infrastrukturen er egnet og trafiksikker.
- Stille krav om el i udbud af busruter og sætte krav i offentlige udbud om elektrificering af varebiler og andre køretøjer til erhverv.
- Mål for udfasning af fossile brændsler for små køretøjer og for lastbiler, skibe og fly bør være opdelte på transportformer.

- Udfasning af fossile anlægsmaskiner på danske byggepladser inden 2030.
- Nationale mål for elektrificering af personbiler og varebiler.
- Danske investeringer i udvikling og demonstrationsprojekter for e-roads med fokus på, hvordan betaling mv. kan gennemføres. Udviklingen af teknologien i Danmark skal ske i samarbejde med vores nabolande Tyskland og Sverige, der allerede er i gang.
- En Power-to-x-strategi. En dansk strategi for elektrolyse og elektrofuels, der indeholder en handlingsplan og et innovationsmarked (tilskud, tarifsystemer mv.) og forskning og udviklingsmidler til området.

International skibs- og flytransport

- Danmark skal arbejde for en fælles europæisk aftale om flyafgifter. Det kan indledes med at den danske regering optager kontakt med vores nabolande – i første omgang dem, der har indført en passagerafgift evt. kombineret med en brændselsafgift – med henblik på at koordinere afgifternes størrelser og principperne bag fastlæggelsen af afgifterne. Der sigtes imod at få flere europæiske lande med og at påvirke EU til at være mere aktiv.
- Den danske regering skal tage problematikken med non-CO₂-emissioner op i EU. Det vil sige emissioner fra fly i højere luftlag, der påvirker drivhuseffekten med henblik på at gøde jorden for en regulering af flyhøjder – i første omgang på europæisk plan og derpå internationalt.
- En national strategi for elektrofuels skal sikre, at Danmark er i den internationale frontlinje med henblik på at udvikle elektrofuels (Power-to-X), der er velegnede til fly- og skibstransport. Strategien skal sikre koordinering og vidensdeling på tværs af de forskellige miljøer.

7.7 Samfundsøkonomi og transport

Transportsektorens tiltag kræver betydelige investeringer. De største er vist i tabel 7. Omkostningerne til vindkraft er regnet ud fra den andel, der svarer til det samlede el-behov til elektrificering minus el-besparelser.

De fleste investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog med følgende kommentarer og tilføjelser:

- Den afdæmpede vækst i personbil-km ift. vækst i basisfremskrivningen er konkret beregnet ved, at der er det samme antal køretøjer i IDAs Klimasvar som i basisfremskrivning (3,3 mio. mod 2,5 i dag), men at disse kører lidt færre km pr. bil. I praksis kan en afdæmpet vækst opnås ved en kombination af færre km pr. bil og færre biler. Hvis en afdæmpet vækst opnås ved færre biler, bliver omkostningerne til det samlede system lavere.
- Der er beregnet 4 elbiler pr. ladestander. Omkostningerne til e-roads er antaget den samme som ellastbiler. Omkostningerne til køretøjer og ladestander er beregnet med udgangspunkt i Energistyrelsens rapport "Alternative Drivmidler" (Danish Energy Agency & Cowi,

2013). I alt giver det en investering på 3,1 mia. kr. frem til 2030 stigende til 5,1 mia. kr. frem til 2045.

Tabel 7. Investeringer i transportsektoren i hovedtal

	Investeringsbehov	Årlige afskrivning og rente i 2030
	Milliarder DKK	Millioner DKK/år
Forskel i investeringer i køretøjer	73,3	6.896
Ladestandere	2,4	277
Anden infrastruktur	2,0	1.975
Elektrolyse	5,5	370
Brintlager	2,3	131
Biomasse forgasning	2,5	165
CO ₂ -hydrogenering	0,5	32
Biomasse hydrogenering	2,1	120
Vindmøller	33,7	1.798
Sum	124,2	11.762

- For køretøjer medtages merinvesteringerne samlet set for el- og plug-in-hybridkøretøjerne i forhold til diesel og benzin køretøjer for biler, lastbiler, busser og varevogne. Frem til 2030 giver det 73 mia. kr. stigende til 105 mia. kr. i 2045.
- Ved hjælp af tidligere analyser af infrastrukturomkostninger til vej og jernbane er de marginale ekstraomkostningerne til den øgede mobilitet på jernbane og cykeltransport taget med i IDAs Klimasvar (Mathiesen et al., 2014) i form af 2 mia. kr. i 2030 stigende til 4 mia. kr. i 2045.
- For roadpricing er der taget udgangspunkt i Trængselskommissionens rapport om landsdækkende roadpricing (Trængselskommissionen, 2013). Dog foreslås her en gradvis overgang med start i en mere lavteknologisk model, som er frivilligt. I alt anslås at udgifterne over tid mod 2030 maksimalt kan blive 0,5 mia. kr./år til drift, investeringer og administration. Udgifterne vil sandsynligvis være lavere grundet den gradvise frivillige overgang.
- En del af det øgede mobilitetsbehov flyttes fra vej og fly til togtransport og cyklisme. Der spares derfor marginale omkostninger i nogle dele, som giver penge til investeringer i andre dele. Marginalt skal der investeres mere som følge af omlægningen af mobiliteten til en mere effektiv transport.
- Investeringerne i vindmøller, elektrolyseanlæg og hydrogenering for at fremstille elektrofuels er medtaget samlet. Der er regnet med 20 pct. tab ved fremstilling af flybrændstof og dermed 20 pct. ekstraomkostninger. For energisystemet er Energistyrelsens Teknologikatolog

anvendt, dog undtaget Carbon capture fra punktkilder, hvor et gennemsnit er anvendt fra fx cementproduktion, biogas og kraftværker på 60 M€/Mt fra (Brynolf et al., 2018).

For at estimere effekten af omlægningerne i transportsektoren, sammenlignes IDAs Klimasvar med en referencesituation, hvor tiltagene ikke gennemføres. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 8. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer.

Tabel 8. Hovedtal for transportsektoren 2030 sammenlignet med en reference, hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs Klimasvar	IDAs Klimasvar uden transporttiltag	Difference
	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>
Brændsel	25.058	34.373	-9.315
Elbalance	83	53	30
Variable drift og vedligehold	315	330	-15
Fast drift og vedligehold	27.368	28.080	-703
Investering	110.085	98.333	11.753
Sum	162.908	161.168	1.740
	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>
CO ₂ -emission	11,52	16,99	-5,48
Gennemsnitlig CO ₂ Reduktionsomkostning		DKK/ton CO ₂	318

Transportsektorens CO₂-emission er udregnet til 12,4 Mt i 2020. I referencen ville emissionen stige til 13,3 Mt i 2030. I forhold til referencen reduceres CO₂-emissionen i IDAs Klimasvar med 5,5 Mt til 7,8 Mt i 2030.

CO₂-reduktionsomkostningen for transport lander på 318 kr./t CO₂ (tabel 8). Det skal dog fremhæves, at dette tal er udregnet med **stor usikkerhed**. De samfundsøkonomiske omkostninger til investering øges med knap 12 milliarder kr., som opvejes af en besparelse på brændsler og drift og vedligeholdelse i samme størrelsesorden. Resultatet er en øget omkostning på 1,7 milliard kr./år, men i sagens natur skal der kun ændres lidt ved forudsætningerne, før dette tal ændres meget.

Størrelsen af CO₂-reduktionen samt selve det forhold, at investeringerne nogenlunde opvejes af besparelserne, dog med en tendens til en øget omkostning, vurderes at være robust, men CO₂-reduktionsomkostningstallet tages med store forbehold.

8 El

Elsektoren omfatter det "klassiske elforbrug", dvs. elforbruget inden det suppleres med elektrificering af varme-, industri- og transportsektorerne. Elektrificeringen er medtaget under de respektive sektorer i form af, hvor mange vindmøller der skal bygges for at dække det øgede behov. Indreguleringen af hele sektoren behandles dog samlet i det følgende som en del af elsektoren. Punktet omfatter også anlæg af de biogasanlæg, der skal til for at omlægge fra naturgas til biogas.

I udgangspunktet er mange af de oprindelige danske kraft- og kraft/varmeværker allerede erstattet af produktion af el fra vindmøller og solceller. Hertil kommer, at store dele af kulbruget i kraft/varmeværkerne er erstattet af importeret biomasse samt af, at 10-15 pct. af naturgasforbruget er erstattet med opgraderet biogas.

Frem mod 2030 foreslås de resterende kulkraftværker lukket og elproduktionen erstattet med vindkraft og solceller samt en mindre andel bølgekraft. Desuden forudsættes de nuværende biomasse og gasfyrede kraft/varmeværker opretholdt, og der foreslås tilført ekstra gasbaseret kraftværkskapacitet, så Danmark bidrager med sin andel af, hvad der behøves i den Europæiske elforsyning. Efter 2030 frem mod 2045 reduceres anvendelse af halm og træflis i kedler og kraft- og kraft/varmeværker i takt med, at de nuværende anlæg ophører. Dog anvendes der som beskrevet i afsnittet om varme fortsat en mindre mængde affald samt en mindre andel særligt tungt fast biomasse i affalds kraft/varmeværker.

8.1 Energieffektivitet og el

Det klassiske elforbrug er ikke blot forbundet med omkostningen til vind eller sol. Der er også omkostninger til opretholdelse af forsynings sikkerheden, når vinden ikke blæser, og når solen ikke skinner. Det er derfor fortsat en god idé at reducere forbruget gennem energieffektivitet.

Konkrete tiltag

- 10 pct. besparelser i det "klassiske elforbrug" i 2030 (20 pct. i 2045).

8.2 Sektorintegration og el

En afgørende fremtidig udfordring for elsektoren bliver at sikre indreguleringen af el fra vind og sol (og evt. bølgekraft). Udfordringen kan opdeles i to dele: Den ene er at udnytte vind og sol, når der er et overskud. Her bliver det billigste og bedste tiltag at sikre fleksibilitet i sektorintegration til elektrificeringen af de andre sektorer, som allerede beskrevet. Den anden udfordring bliver at sikre produktion af el (eller fleksibelt elforbrug), når der er et underskud af produktion af el fra vind og sol. Den nuværende timespidslast i det klassiske elforbrug har de sidste 10 år ligget på ca. 6.000 MW. Med de forudsatte elbesparelser forventes den også at ligge på dette niveau frem til 2030. Elektrificeringen af de øvrige sektorer forventes i høj grad at kunne foregå uden at bidrage til en forøgelse af kapacitetskravet, idet der vil være tale om fleksibelt elforbrug, der vil kunne undgås på de kritiske tidspunkter.

I analyserne er der taget udgangspunkt i Energistyrelsens analyseforudsætninger AF2019 (Energistyrelsen, 2019a). Her forventes kraftværkskapaciteten at falde fra de nuværende små 6.000 MW i 2020 til lidt over 4.000 MW i 2030. Denne udvikling er ikke enestående for Danmark, men er generel for Europæiske lande, idet kapaciteten falder i takt med at kraftværker erstattes med vedvarende energi. De enkelte lande vil kunne hjælpe hinanden gennem udveksling af el, hvor forskelle i vind og sol og forskelle i forbrugsmønstre og tidspunkter delvist vil kunne afhjælpe problemet. Hertil kommer, at man vil kunne mindske problemet ved at gøre brug af fleksibelt forbrug. Tilbage står dog, at der i det samlede europæiske system vil være behov for spids- og reservelast til et vist niveau for at kunne opretholde en sikker elforsyning.

IDA foreslår, at Danmark planlægger efter princippet, at Danmark bidrager med vores andel af den kraftværkskapacitet, der skal være i Europa for at sikre en sikker elforsyning.

Et sådant princip medfører samtidigt, at når der skal stå en vis kapacitet et eller andet sted i Europa, så må den del, der er baseret på kraft/varmeværker gerne stå i Danmark, hvor overskudsvarmen kan udnyttes til fjernvarme. Det skal dog fremhæves, at sådanne fremtidige værker vil have betydeligt lavere benyttelsestider end hidtil. Man vil især skulle satse på kraftværkskapacitet med lave anlægsinvesteringer. Til gengæld er effektiviteten ikke så afgørende.

Præcist hvor meget Danmark skal stile mod, og hvorvidt der er behov for det allerede i 2030, eller behovet først kommer herefter er svært at sige præcist. Det afhænger af udviklingen i resten af Europa.

I IDAs forslag er der dels indregnet, at vi bevarer kapaciteten i de nuværende decentrale kraft/varmeværker og dels, at der bygges 1.400 MW ny kapacitet baseret på fleksible gasfyrede kraftværker.

Konkrete tiltag

- Indregulering af vind, sol og bølgekraft med varmepumper og elektrolyseanlæg fra de andre sektorer.
- Nedlæggelse af kulkraft-værker.
- Fokus på nedregulering af eksisterende biomasseværker i 2030 når der er overskud af el-produktion fra vind-, sol- og bølgekraft.
- Bevarelse af decentrale gasfyrede kraftvarmeværker samt opførelse af nye gasfyrede kraftvarmeværker for at sikre effekt i takt med behovet frem mod 2030 og 2045.

8.3 Biomasse og el

De eksisterende biomassekraft-/varmeværker videreføres og er i drift i 2030, men producerer mindre, idet der er fokus på at regulere produktionen ned, når der er overskud af strøm fra vindkraft mv. Det betyder dels et mindre forbrug af fast biomasse og dels et mindre forbrug af naturgas i de decentrale værker. Til gengæld kommer der et øget forbrug af naturgas i de nye spids- og reservelast kraft- og varmeværker. Efter 2030 frem mod 2045 erstattes værker baseret på fast biomasse løbende af spidslast kraft- og kraft/varmeværker baseret på opgraderet biogas.

I det samlede system (alle sektorer inklusive) reduceres naturgasforbruget fra 90 PJ i 2020 til 43 PJ i 2030 og til 0 i 2045. IDAs Klimasvar foreslår biogasproduktionen udvidet til 35 PJ/år i 2030 og 60 PJ i 2045. Dette forudsætter, at der anvendes en vis mængde halm som supplement. (Se afsnittet om biomasse).

Konkrete tiltag

- Biogasproduktionen forøges til 35 PJ i 2030 og til 60 PJ i 2045.
- Der anvendes træflis og halm i kraftvarmeværker og fjernvarmekedler i 2030, men de udfases i 2045 hvor der udelukkende anvendes opgraderet biogas i 2045.

8.4 Vedvarende energi og el

IDAs Klimasvar foreslår, at der primært satses på vindkraft, men at der suppleres med solceller og i mindre omfang bølgekraft.

Mht. bølgekraft er det tidligere forslag fra IDAs Energivision fra 2015 indregnet, dvs. 132 MW bølgekraft svarende til en elproduktion på 0,46 TWh/år. Dette forslag har primært som formål at sætte fokus på at udvikle denne teknologi, som på den lange bane vil kunne være et godt supplement til sol- og vindkraft. Hvis måltallet ikke opfyldes i 2030, bør man bygge yderligere en tilsvarende vindkraftkapacitet.

Teknisk og økonomisk set ift. indregulering og indpasning er det bedste forhold, at vind bidrager med 80 pct. og sol med 20 pct. af elproduktionen. Pga. forskelle i benyttelsestider svarer det nogenlunde til, at der installeres den samme kapacitet. Her er det imidlertid valgt at have mindre sol end vind.

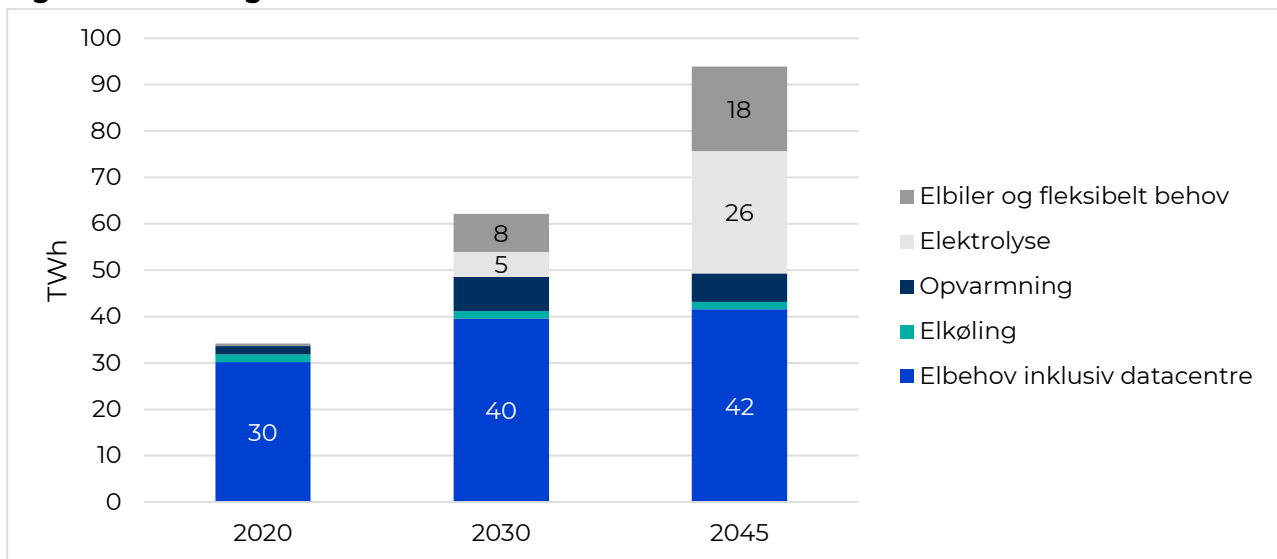
Det skyldes, at solcellernes andel er vurderet ud fra et hensyn til arealanvendelsen, og derfor begrænset til et mål om 5.000 MW i 2030 stigende til 10.000 MW i 2045. Der er dog fortsat tale om en tydelig forøgelse sammenlignet med den nuværende kapacitet på ca. 1000 MW. Arealanvendelse og indpasning i elsystemet bliver en større og større udfordring i fremtiden. Både hvad angår elproduktions- og elforbrugsanlæg. I det udstræk vi bruger markanlæg til etablering af 10.000 MW solceller, skal vi bruge 150-160 km². Det er et areal, som svarer til 2 gange Ærø eller 2 gange arealet af Københavns Kommune. Arealet på store tage over 500 m² omkring de større byer og i alle kommuner rundt omkring i landet har et potentiale på op mod 20.000 MW og tælles tage på over 200 m² med, er potentialet 50.000 MW (Mathiesen *et al.*, 2017). Potentialet er således langt større end det, der er plads til i det danske elsystem. Ikke alle store tage er egnede til solceller. Omvendt er potentialet meget stort. Her regnes med omkostninger svarende til store tage, hvilket er marginalt dyrere end markanlæg i omkostninger, men stadig langt billigere end husstandsanlæg. Desuden har anlæg på industritage den fordel, at de kan placeres på tage tæt på de konkrete forbrug og i forbindelse med det nuværende elnet.

Konkrete tiltag

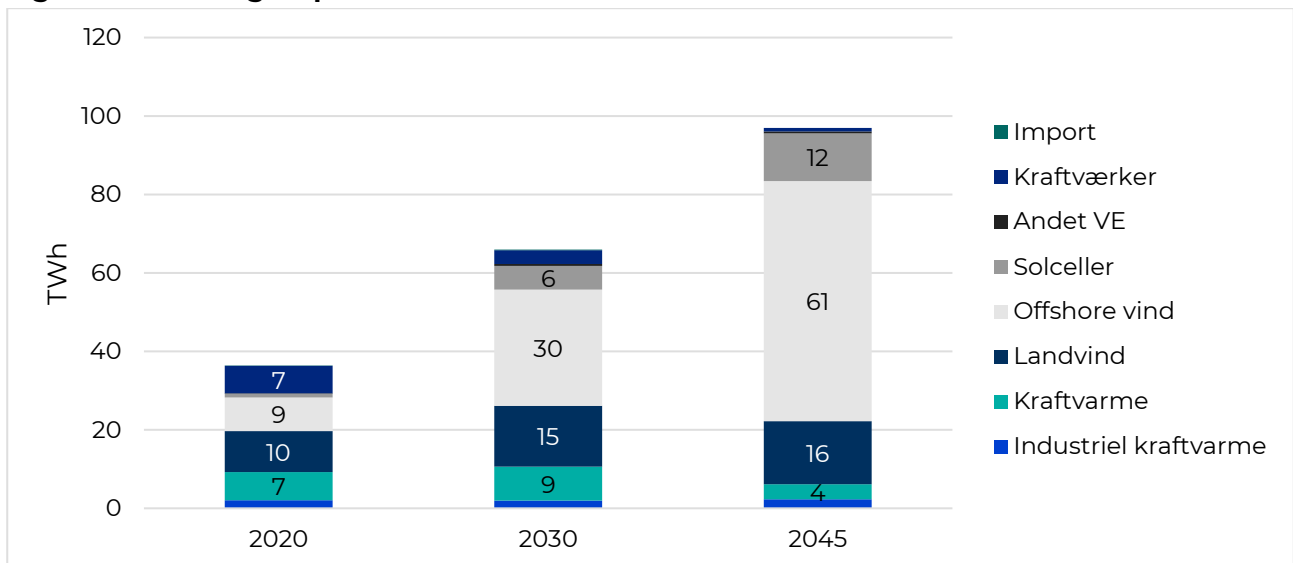
- 130 MW bølgekraft.
- 5.000 MW i 2030 og 10.000 MW i 2045 solceller på store tage (nu 1.000 MW).
- Mindst 4.800 MW i 2030 og 5000 MW i 2045 onshore vindkraft onshore (nu 4.200 MW).
- 6.630 MW i 2030 og ca. 14000 MW i 2045 vindkraft offshore (nu 2.000 MW).

Figur 13 og 14 viser udviklingen i elforbrug og produktion.

Figur 13. Udvikling i elbehov



Figur 14. Udvikling i elproduktion



8.5 Teknologiske udfordringer i omstillingen af elsektoren

Vindkraft og solceller må betegnes som velkendte og afprøvede teknologier. De største udfordringer, hvor der især er behov for forskning og udvikling forventes at være i forbindelse med bølgekraft og intelligent integration af de vedvarende energiformer i elnettet samt fleksibel drift af biomasse kraft/varmepumper.

- Fleksibel drift af eksisterende biomasse kraftvarmepumper.
- Bølgekraft (vindmøller som alternativ).
- Intelligent integration af vind og sol i elnettet (herunder placering af nye anlæg og undgå unødigt udbygning af elnettet).
- Anvendelse af halm til biogas.

8.6 Virkemidler der fremmer omstillingen af elsektoren

- Omlægning af elafgifter på private forbrug, så rabatten på elvarme og varmepumper ikke giver rabat på al elforbrug, men i stedet fremmer energieffektivisering. Generelt bør rabat på elafgiften til direkte elvarme hindres, og der skal fortsat stilles krav til varmepumper af hensyn til energieffektivitet. Konkret forslås, at afgiftsrabatten for elforbrug over 4.000 kWh erstattes af en ny ordning. Det kan gøres på to måder enten:
 - De, der har en varmepumpe, får afgiftslettelse op til 4.000 kWh, og alt herover over har almindelige afgifter.
 - Eller: afgiftslettelsen gøres afhængig af, at der opsættes en særskilt måler til varmepumpen.
- En ordning med separat måler kan udvides til også at give lave afgifter til elbilsjere.
- Lokalt ejerskab af landvindmøller fremmes blandt andet ved at gøre det muligt for fjernvarmepumper at købe andele af lokale vindmøller fx svarende til den mængde el, der bruges i en varmepumpe på fjernvarmepumpen. Ordningen skal især bruges til at øge vindmøllekapaciteten indenlands på en positiv måde for lokalsamfundene.
- Ovennævnte forslag kan kombineres med en afgiftslettelse (evt. ligestilling med individuelle varmepumper) og evt. en tariffordel.
- Der skal udarbejdes en national strategi for solceller og landvindmøller. Kommunerne bør lave solcelleplanlægning i lighed med vindmølleplanlægning. For solceller skal brug af store industritage og P-arealer og motorveje prioriteres og bør ikke opstilles ukritisk på landbrugsjord. Man kunne indføre grønne, gule og røde zoner, baseret på input fra Energinet om, hvor nettene er svage og stærke eller allerede har meget vedvarende energi. Energinet og netelskaberne bør udarbejde en nettilslutningstarif for landvind og solceller, der afspejler de marginalomkostninger, udbygninger af elnettet kræver. Disse kan være høje i områder med lavt elforbrug og i forvejen høje andele af vedvarende energi, men lave eller helt væk i områder med gode elnet og højt elforbrug.

- En revision af elmarkederne skal sikre mere lokal udnyttelse af vedvarende energi ved at lokale elnettariffer, animerer til at slukke eller tænde forbrug i stedet for, at vedvarende energi går til spilde ved, at der slukkes for vindmøllerne.
- Elmarkederne skal desuden sikre velfungerende PPA-aftaler, som giver den fornødne udbygning med landvind, offshore vind og solceller samt sikre, at der er rentabilitet i sikring af spids- og reservelast på den lange bane. Dette er en særlig udfordring, pga. et lavt antal driftstimer.
- Tarifomlægningen kan med fordel suppleres med planlægning og zonerings af hensigtsmæssige placeringer af vedvarende energi og placering af nye forbrug mht. Power-to-X, datacentre mv. Dette skal også sikre, at overskudsvarme og andre synergier udnyttes.

8.7 Samfundsøkonomi og el

Elsektorens tiltag kræver betydelige investeringer i især vindkraft og solceller. De største er vist i tabellen herunder.

Tabel 9. Investeringer i elsektoren 2030 i hovedtal

	Investeringsbehov	Årlige afskrivning og rente i 2030
	<i>Milliarder DKK</i>	<i>Millioner DKK/år</i>
Bølgekraft	4,8	303
Vindkraft – onshore ift. 2020 niveau	3,3	174
Vindkraft – offshore ift. 2020 niveau	75,0	3.999
Solceller ift. 2020 niveau	21,1	937
Fleksibel elbehov	3,5	235
Nye gasfyrede værker	15,6	897
Biogasanlæg	18,2	1.223
Sum	141,5	7.768

Alle investeringer er regnet med udgangspunkt i Teknologikataloget, dog undtagen:

- Fleksibelt elbehov. Her antages fremrykning af omkostningerne identificeret i IDAs Energivision for 2035. Investeringsbehovet for fleksibelt elbehov i husholdninger og industri er sat 3,5 mia. kr. Hele investeringen forudsættes foretaget inden 2030.

For at estimere effekten af investeringerne i elsektoren, sammenlignes IDAs Klimasvar med en referencesituation, hvor tiltagene ikke gennemføres. Hovedtal for denne sammenligning er vist i tabel 10. Generelt spares der omkostninger til brændsel til gengæld for øgede investeringer.

Tabel 10. Hovedtal for elsektoren 2030 sammenlignet med en reference, hvor tiltagene ikke gennemføres

	IDAs klima- svar	Reference uden eltiltag	Difference
	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>	<i>Millioner DKK/år i 2030</i>
Brændsel	25.058	36.323	-11.265
Elbalance	83	90	-8
Variable drift og vedligehold	315	788	-473
Fast drift og vedligehold	27.368	24.923	2.445
Investering	110.085	105.405	4.680
Sum	162.908	167.528	-4.620
	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>	<i>Mton</i>
CO ₂ -emission	11,52	19,57	-8,06
Gennemsnitlig CO ₂ - reduktionsomkostning		DKK/ton CO ₂	-573

Elsektorens CO₂-emission er udregnet til 6,5 Mt i 2020. I referencen ville emissionen være steget til 8,6 Mt. i IDAs Klimasvar reduceres CO₂-emissionen med 8,0 Mt til 0,6 Mt i 2030. Den resterende CO₂-emission på 0,57 Mt hidrører primært fra, at kraft- og kraft/varmeværker delvist fyres med naturgas.

CO₂-reduktionsomkostningen for el lander på -573 kr./t CO₂ (tabel10). Det skal dog fremhæves, at dette tal tilsvarende for de andre sektorer er udregnet med **en vis usikkerhed**. Det skal også nævnes, at regnestykket i den viste form omfatter alle vindmøller, også de der er nævnt under de andre sektorer.

9 Energieffektivitet

I IDAs Klimasvar er de samlede tiltag vedr. energieffektivitet som udgangspunkt formuleret ud fra, hvad der passer bedst ind i det samlede energisystem og ud fra, hvad der samfundsøkonomisk er bedst. Der er imidlertid også taget hensyn til, at Danmark vil kunne opfylde vores forpligtelser iht. EU's energieffektiviseringsdirektiv (EED).

I henhold til det reviderede EED skal medlemsstaterne i 2021-2030 opnå kumulative energibesparelser i slutanvendelserne svarende til mindst nye besparelser hvert år fra den 1. januar 2021-31. december 2030 på 0,8 pct. af det årlige endelige energiforbrug målt i gennemsnit over den seneste treårsperiode forud for den 1. januar 2019, dvs. for perioden 2016-2018.

Direktivet giver en række muligheder for at medregne besparelser i forsyningen og for at opnå reduktioner i forpligtelsen, men en anvendelse af disse muligheder ændrer ikke ved, at der skal opnås besparelser i slutforbruget svarende til 0,8 pct. af det endelige forbrug. Hvis besparelser i forsyningen mv. skal medregnes, skal målet dermed øges tilsvarende. Det betyder, at direktivet reelt ikke indeholder nogle incitamenter til at anvende energieffektivisering i produktionen til opfyldelse af forpligtelsen.

Ud fra tal fra Eurostat for det endelige energiforbrug i 2016-2018 kan det danske årlige mål beregnes til 4,96 PJ, og det akkumulerede mål over perioden er dermed 272,8 PJ.

De vigtige punkter er:

- At der for perioden 2021-2030 reelt kun kan medregnes energibesparelser i slutforbruget, dvs. ude hos forbrugerne (husholdninger, virksomheder, transport).
- At der skal være tale om nye besparelser, og at besparelserne skal være kumulative.
- At der kun kan medregnes effekter af virkemidler.

IDAs Klimasvar indeholder følgende tiltag i slutforbruget, som må betegnes som nye og kumulative:

- Varmebesparelser - 2,2 PJ/år.
- Elbesparelse - 1 PJ/år.
- Energibesparelser i industri - 2,4 PJ/år.
- Omlægning til fjernvarme og individuelle varmepumper - 0,24 PJ/år.
- Reduktion i personbil km og flyrejser - 0,8 PJ/år.

Sammenlagt giver disse besparelser et tal, der er større end 4,96. Det afgørende punkt bliver således, om der kan argumenteres for, at disse besparelser skyldes nye konkrete virkemidler. IDAs forslag om virkemidler til at opnå øget energieffektivitet er derfor centrale.

Tilsvarende besparelser og effektiviseringer er indregnet i perioden 2030-2045.

10 Sektorintegration

En vigtig erfaring fra tidligere arbejde i IDA-regi er, at det er når man har fokus på, hvordan de forskellige sektorer kan hjælpe hinanden, og hvor der er synergi, at man kan finde frem til de bedste og de billigste løsninger - også italesat som "det smarte energisystem". Sektorintegrationen er derfor centralt for IDAs Klimasvar.

En omstilling til 100 pct. vedvarende energi og CO₂-neutralitet i varme- og industri- og transportsektorerne kræver et input fra elsektoren i form af elektricitet fra bølge- sol- og vindkraft. Omvendt kan elsektoren spare store omkostninger til energilagring, som er betydeligt billigere i de andre sektorer, end det er internt i elsektoren.

I IDAs Klimasvar er der fokus på at udnytte denne synergi. Således er der indregnet el fra vindkraft til elektrificeringen af de øvrige sektorer, og der er indregnet følgende energilagre samt overkapaciteter i anlæg for at øge fleksibiliteten:

- Store varmelagre på i alt 112 GWh i 2030 og ca. 200 GWh i 2045.
- Udnyttelse af de eksisterende naturgaslagre og etablering af brintlagre på i alt 40 GWh i 2030 og 320 GWh i 2045.
- Overkapacitet på elektrolyseanlæg svarende til en 50-60 pct. udnyttelse.
- Udnyttelse af sæsonafhængig overkapacitet på varmepumper samt elkedler for 700 MW i 2030 og 1500 MW i 2045.
- Udnyttelse af batterier (14 GWh i 2030 og 37 GWh i 2045) i elkøretøjer vha. intelligent opladning.
- Flexibelt elforbrug (primært indenfor døgn) på ca. 2,5 TWh ud af et klassisk elforbrug på 30 TWh.

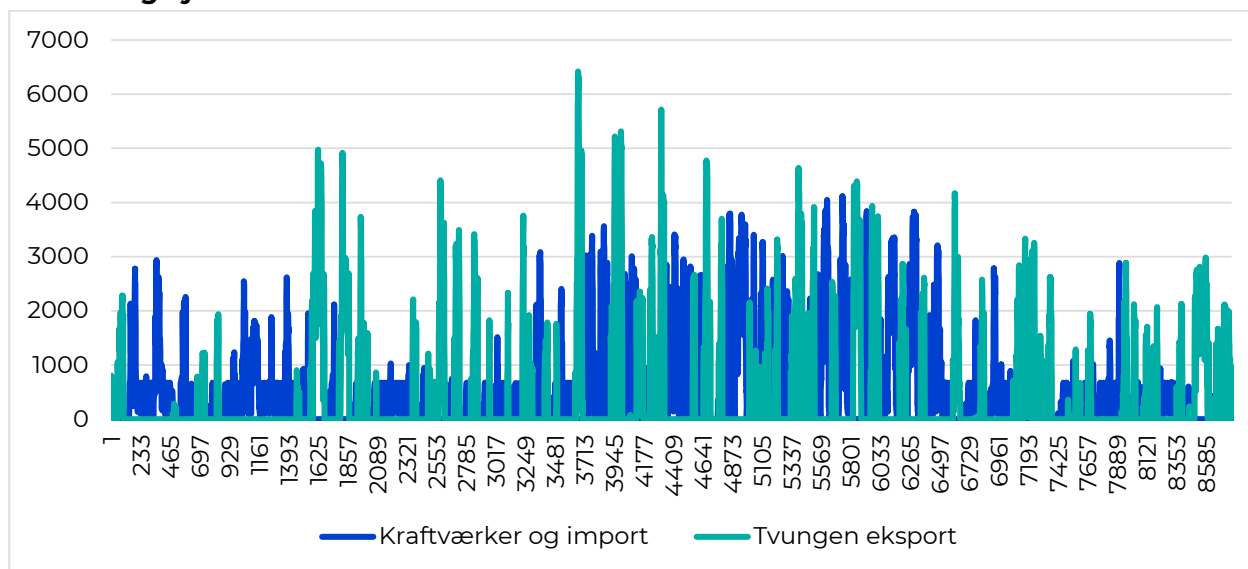
I relation til udnyttelse af brintlagerene er der regnet med, at der inden 2045 investeres i et brint transmissionsnet, der kan forbinde elektrolyseanlæggene med brintlagrene og med de største aftagere. Med udgangspunkt i elektrolyse-anlæggenes kapacitet på knap 4000 MW og en sammenligning med længden på naturgas transmission-nettet (knap 1000 km) er der ud fra forsyningskatalogets priser lavet et estimat på en investeringsomkostning på 10 mia.kr. Der er regnet med en levetid på 45 år.

Energisystemanalyserne i IDAs Klimasvar viser, at disse tiltag bringer ubalancerne mellem produktion og forbrug af el i det samlede system i 2030 ned på et niveau, der kan udtrykkes ved følgende:

- En tvungen eleksport hhv. stop af vindmøller på 3,60 TWh/år svarende til 6 pct. af den samlede elproduktion.
- En produktion af el på spids- og reservelast kraftværker eller fra import også på 3,65 TWh/år svarende 6 pct. af det samlede elforbrug.

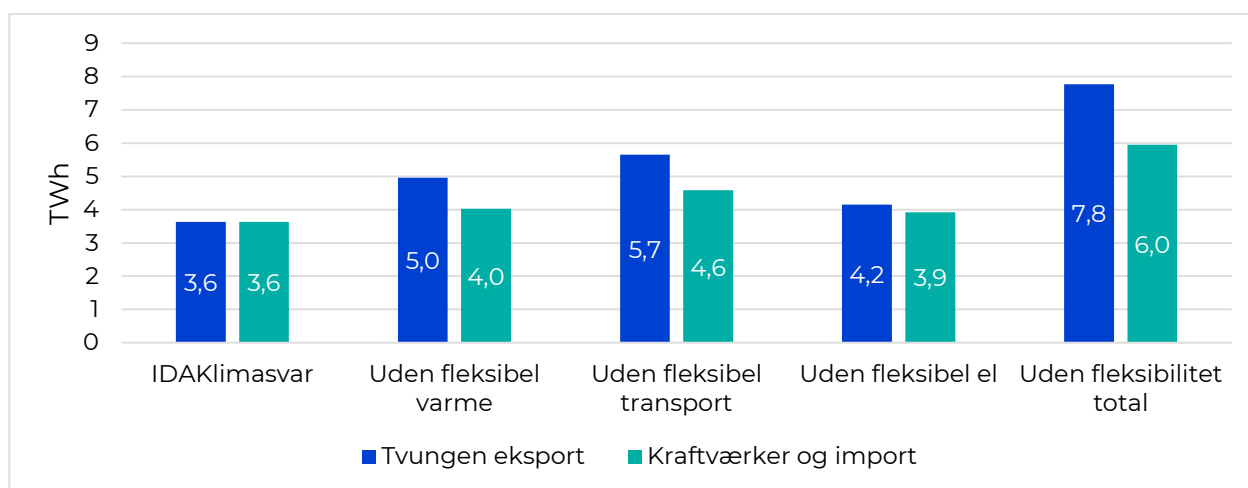
Figur 15 viser den tidsmæssige fordeling af disse ubalancer i form af resultatet af en timesimulering af energisystemet i 2030.

Figur 15. Ubalancer mellem elforbrug og produktion i 2030 i en timesimulering af det samlede energisystem.



Hvis der ikke investeres i og gennemføres omlægninger, der sikrer fleksibilitet og sektorintegration, ville ubalancerne være væsentligt større. I figur 16 er vist hvordan den tvungne eksport ville stige fra 3,6 TWh til næsten 8 TWh. Figuren viser også, hvordan det især er bidrag til fleksibilitet fra varme- og transportsektoren, der betyder noget. Ud over tvungen eksport og øget behov for kraftværker og import, har mangel på fleksibilitet også betydning for CO₂-emissionen og presset på biomasse. Uden fleksibilitet stiger CO₂-emissionen i 2030 således fra 11,5 til knap 12,2 Mt og biomasseforbruget (inkl. affald) fra 137 til 149 PJ.

Figur 16. Ubalancer i energisystemet i 2030 med og uden sektorintegration og fleksibilitet.



IDAs Klimasvar stiler efter, at Danmark skal kunne leve op til princippet om, at vi skal bidrage med vores andel af fleksibilitet og reservekapacitet på elnettet i en europæisk sammenhæng.

Med dette princip vil en del af ubalancen kunne afhjælpes til gensidig fordel ved udveksling med vores nabolande. Ift. opgørelsen af CO₂-reduktioner er det forudsat, at halvdelen af denne ubalance kan udveksles med nabolande til gensidig fordel. Dvs. forskelle i vind og sol mellem landene samt lagermuligheder i især den norske vandkraft forudsættes at udligne hinanden uden at dansk import fører til øget kraftværksproduktion.

Herved lander den samlede CO₂-emission for transport og energi på lidt under 11 Mt i 2030.

Tilsvarende analyser for 2045-scenariet viser en import/eksport af 4,81 TWh ud af en total el-produktion på ca. 97 TWh og et tab på 4,97 TWh.

11 Biomasse

Det nuværende forbrug af biomasse inkl. affald er i Danmark vokset fra ca. 20 PJ i 1980 til knap 170 PJ i 2018, hvoraf 75 PJ (primært træflis) er importeret.

I IDAs Klimasvar bringes det samlede biomasseforbrug i 2030 ned på ca. 137 PJ, hvoraf 35 PJ er biogas og 13 PJ er affald. Anvendelse af affald er reduceret fra de nuværende ca. 40 PJ til 13 PJ, så energiudnyttelsen ikke står i vejen for mere genbrug og genanvendelse. Dog medregnes der et bidrag på 14 PJ fra organisk affald som input til biogasproduktion.

Mængden af importeret træflis reduceres til ca. 50 PJ i 2030. Ved en aktiv satsning på anvendelse af danske træressourcer burde importen af træpiller yderligere kunne reduceres til ca. 20 PJ.

Målt per capita bringes biomasseforbruget ned fra ca. 29 GJ/capita til ca. 24 GJ/capita. Herved er Danmark godt på vej til at bringe sig i en situation, hvor vi holder os indenfor vores andel af et globalt bæredygtigt biomasseforbrug.

Tabel 11. Udfordringer ved biomasseforbrug i Danmark og globalt

	Biomasseforbrug pr. person
I dag i DK (166 PJ)	29 GJ/capita
Seneste forskning for EU (8500 PJ) (Hamelin <i>et al.</i> , 2019)	17 GJ/capita
EU 2050 scenarier (A Clean Planet for all)	14 - 21 GJ/capita
IDA 100 pct. VE i 2050 (200 PJ – Dansk andel)	32 GJ/capita
Energistyrelsens scenarier fra 2014	35 – 45 GJ/capita

Anvendelsen af biomasse i IDAs Klimasvar 2045 er sammensat ud fra en række forskellige hensyn.

Overordnet er målet at kunne nå frem til en samlet løsning med nul CO₂-emission i energi og transport inden for rammerne af, hvad der er Danmarks andel af verdens bæredygtige biomasse ressourcer. For at kunne opnå det, er der især behov for at kunne konvertere biomassen på en måde, så den sammen med brint fra elektrolyse (PtX) kan tilvejebringe tilstrækkelige mængder brændsler til især transportsektoren. Hertil kommer et behov i industrien og til spids- og reservelast elproduktion, når vind og sol ikke er nok i en europæisk sammenhæng. På sigt skal biomasse således ikke bruges til fjernvarmeproduktion og i individuelle anlæg.

Der er således især brug for konverteringsteknologier, der kan bringe biomasseressourcen over på gasform eller som flydende brændsel, der kan bruges i fly, skibe, lastbiler, industri og spidslast fleksible kraft/varmeverker.

Der er en række forskellige teknologier, som kan komme i spil til biomassekonverteringen. Disse teknologier er karakteriseret ved, at de har forskellige egenskaber dels ift. hvilke typer biomasse,

de er bedst til at håndtere (især våd kontra tør biomasse) og dels ift. hvilket slutprodukt de frembringer i form af enten gas eller olie, og hvordan disse produkter indgår ift. hydrogenering og raffinering.

Samtidig er teknologierne stort set alle sammen forbundet med teknologisk usikkerhed i forhold til udviklingsstadie, økonomi ved skalering og kommercialisering samt driftssikkerhed og virkningsgrader.

Disse forhold har ledt til, at IDAs Klimasvar foreslår en strategisk løsning, hvor der indgår flere forskellige teknologier med fokus på:

- At gøre brug af de forskellige teknologiers fortrin ift. samlet set at kunne anvende biomasse-ressourcerne bedst, og
- At opnå en robust løsning, hvor der er andre teknologier, der kan tage over, hvis enkelte teknologier viser sig at være for vanskelige at udvikle hurtigt nok til storskala kommercielle anlæg.

Samme strategi gør sig i øvrigt gældende ift. transportsektoren. Her tilstræbes også en robust løsning med flere teknologisor. Endelig har biomasseløsningerne store snitflader til muligheder for "sink" via CCS eller Biochar, hvor mulighederne for CO₂-fangst er forskellige. Også på det punkt stiles mod en flerstrengt robust løsning.

Anvendelse af biomasse i IDAs Klimasvar 2045 sker således ud fra følgende principper:

- Mængden ønskes på langt sigt reduceret til Danmarks andel af verdens bæredygtige biomasseressourcer. Det betyder dog ikke, at de danske ressourcer nødvendigvis skal anvendes i Danmark, eller at det ikke kan komme på tale at handle med biomassen over landegrænserne.
- Biomassetyper og teknologier med lave netto-CO₂-emissioner prioriteres højest
- Løsninger med integration af brint fra elektrolyse og fleksibilitet prioriteres
- Pga. den teknologiske usikkerhed prioriteres en robust løsning med flere parallelle teknologier, som helt eller delvist kan erstatte hinanden.
- Der tilstræbes en robust løsning med flere muligheder for "sink", dvs. både CCS og "Biochar".

11.1 Bæredygtige biomasse ressourcer

Der pågår i øjeblikket internationalt en diskussion af, hvor stor mængden af bæredygtig biomasse til energiformål i verden kan antages at være. Iflg. Energistyrelsen (Danish Energy Agency, 2020) er mængden opgjort til et sted mellem 100 og 300 EJ/år svarende til et sted mellem 10 og 30 GJ/capita, mens IPCC vurderer, at der på sigt blot er i størrelsesordenen 100 EJ/år til rådighed. Det bør nævnes, at definitionen af, hvad der er bæredygtigt, afhænger af, hvad man gør, og hvordan man udnytter ressourcen. Der er fx muligheder for at øge mængden af bæredygtig biomasse i de danske skove og fra danske marker (som beskrevet herunder), og der er muligheder for at samtænke biomasseudnyttelsen med tilbageførelse af næringsstoffer og CO₂-sink.

I IDAs Klimasvar 2045 er der taget udgangspunkt i følgende opgørelse af bæredygtige biomasseressourcer i Danmark forventet i 2045 (Se tabel 12). Det bør understreges, at formålet med at opgøre de danske ressourcer ikke er at se på Danmark som et lukket rum. Formålet er at opgøre, hvilket input Danmark kan give til summen af verdens samlede biomasseressourcer. Der bør handles over grænserne med biomasse, hvis det vil kunne give anledning til en samlet set bedre løsning. Som det fremgår senere, foreslås det i IDAs Klimasvar 2045 da også, at der eksporteres grøn gas baseret på biogasproduktion i Danmark.

Tabel 12. Opgørelse af biomassepotentiale i Danmark

Biomasse		Potentiale i 2045	Kilde og forklaring
Biogas	Gylle og gødning	20 PJ	Opgørelsen er baseret på rapporten "Energiafgrødeanalysen" udarbejdet af SDU og SEGES for Energistyrelsen, januar 2020 (Wenzel et al., 2020). I opgørelsen udvikler potentialet sig over tid, og de viste tal gælder for 2040. Potentialet skal forstås som en øvre grænse under forudsætning af fuld anvendelse af al biomasse.
	Dybstrøelse	7 PJ	
	Industri og restaffald	8 PJ	
	Kasserede afgrøder	1 PJ	
	KOD og grønt affald	6 PJ	
	Grønt landbrugsaffald	7 PJ	
	Sum	49 PJ	
Halm		45-75 PJ	Potentialet er baseret på "Energiafgrødeanalysen" udarbejdet af SDU og SEGES for Energistyrelsen, januar 2020 (Wenzel et al., 2020). Potentialet er opgjort til 75 PJ som et øvre loft dog ekskl. halm fra kvægbrug (som antages anvendt på gården og dermed indgår i opgørelse af bl.a. dybstrøelse). Historisk er der typisk anvendt op til 20-25 PJ-halm i energiforsyningen. De 75 PJ-halm vil iflg. kilden kunne omsættes til ca. 45 PJ-biogas, hvor de resterende 30 PJ tilbageføres til jorden sammen med næringsstoffer. Netto giver løsningen i runde tal den samme CO ₂ -emission som nedmuldning af alle 75 PJ.
Træ	Træflis	35-60 PJ	Potentialet er baseret på "Fremtiden for dansk skovflis mod 2050" (TræTilEnergi, 2020). Der er tale om et restprodukt, der skal fjernes for at den resterende bevoksning kan vokse. Potentialet indeholder såkaldte power-kulturer, dvs. hurtigtvoksende hjælpetræer som f.eks. lærk. Potentialet på 35 PJ er baseret på det nuværende skovareal, mens det høje potentiale på 60 PJ forudsætter 200.000 ha produktiv skovrejsning. I opgørelsen er der efterladt ca. 90.000 m ³ træ om året til et målrettet løft af biodiversiteten.
	Brænde, træpiller og træaffald	15-20 PJ	
	Sum	40-80 PJ	
			Ud over flis vil der fortsat være et indenlandsk bidrag fra brænde fra de danske skove svarende til det nuværende på omkring 3-4 PJ (Nord-Larsen, Thomas; Johannsen, Vivian Kvist; Riis-Nielsen, Torben; Thomsen, Iben Margrete; Jørgensen, 2020) plus et tilsvarende bidrag fra det åbne land på 3-4 PJ. Hertil kommer 2,7 PJ træpiller og træaffald 9 PJ (højt sat) - i alt 15-20 PJ.
Affald		13 PJ	Affald er opgjort med udgangspunkt i den nuværende mængde på ca. 40 PJ fratrullet øget genanvendelse og fradrag af organisk andel til biogas. Den sidste andel svarer til 14 PJ nævnt under biogas som "industri og restaffald" samt "KOD og grønt affald".
Sum		160-220 PJ	Det skal understreges, at der er tale om et max potentiale i form af en øvre grænse.

Ud over de i tabellen anførte ressourcer vil man også kunne supplere med Energiafgrøder. Opgørelsen af træflispotentialer er som anført afhængigt af, hvor meget skovrejsning, der gennemføres, og om denne skovrejsning er produktiv skov. Her er der valgt at tage udgangspunkt i en skovrejsning på 100.000 ha produktiv skov, som iflg. rapportens forfattere flugter med de politiske udmeldinger om øget skovrejsning. Under denne forudsætning er potentialer i 2045 opgjort til 40 PJ-træflis. Opgørelsen omfatter imidlertid ikke, hvad der i energistatistikken opgøres som brænde, træpiller og træaffald. Denne ressource kommer oven i. Rapportens forfattere estimerer, at den vil kunne udgøre ca. 15 PJ i 2045.

Ud fra tabellen er der valgt at tage udgangspunkt i følgende tal: 45 PJ Biogas, 45 PJ-halm, 55 PJ-træ og 13 PJ-affald = 158 PJ-biomasse i 2045, hvilket svarer rimelig godt overens med både Energistyrelsens og IPCC's antagelse om, hvor meget bæredygtig biomasse, der er til rådighed per capita på verdensplan (De 45 PJ-halm kan enten være 75 PJ gennem et biogasanlæg med 30 retur til nedmuldning eller 45 PJ anvendt i andre teknologier).

11.2 En robust flerstrengt konverteringsteknologipakke med synergi

IDAs Klimasvar 2045 forslår, at Danmark arbejder med en kombination af følgende konverteringsteknologier:

11.2.1 Biogasanlæg

Biogasanlæg er en udviklet teknologi, som er særligt velegnet til at håndtere våde ressourcer som gylle, gødning, dybstrøelse og organisk affald. Hertil kommer muligheden for at iblande halm. Halm kræver en meget lille forøgelse af volumen i reaktortankene og dermed meget små ekstrainvesteringer i anlæg. Output er biometan samt CO₂, som er relativt let at fange ved opgradering. Fra halmen er forholdet 50/50 mellem metan og CO₂, mens det ved resten er typisk 35% CO₂ og 65% metan.

11.2.2 Termisk forgasning

Termisk forgasning kan omsætte tør biomasse (træ og halm) til syntesegas ved relativt høje virkningsgrader (forventet 80% efter 2030). Syntesegassen har et højt kulstofindhold og egner sig godt til hydrogenering og videre raffinering til flydende brændsler i form af metanol, DME eller JF. Termisk forgasning er demonstreret på træflis, mens der er større teknologisk usikkerhed for anvendelse af halm.

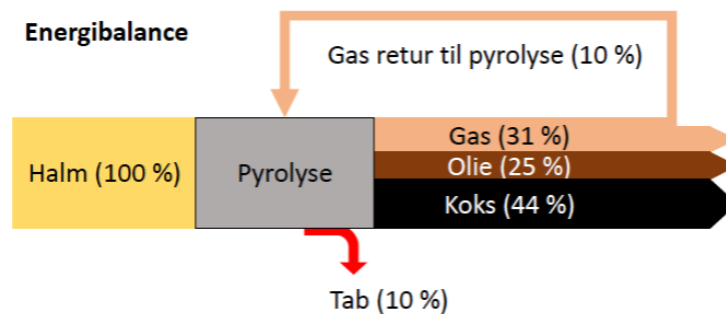
11.2.3 Opgraderingsanlæg (Metan og Metanol)

Syntesegas fra termisk forgasning kan omdannes til biometan (svarer til opgraderet biogas) gennem metanisering med en virkningsgrad på ca. 82%. I processen kan der også tilsættes brint, således at 0,69 PJ syntesegas og 0,53 PJ-brint tilsammen giver 1 PJ-metan. Eller syntesegassen kan omdannes til metanol med en virkningsgrad på 80%. Igen kan der også tilsættes brint, således at 0,63 PJ syntesegas og 0,61 PJ-brint tilsammen giver 1 PJ-metanol.

11.2.4 Pyrolyse

Pyrolyse er formodentlig billigere i anlæg end termisk forgasning. Til gengæld kommer der mindre gas og olie ud af anlægget. På den anden side kommer restproduktet ud i form af biochar. Pyrolyseanlægget kan designes til forskellige output. Her er der taget udgangspunkt i et anlæg med en energiomsætning som illustreret her:

Figur 17. Energiomsætning (øvre brændværdi) i et Pyrolyseanlæg ved kombination



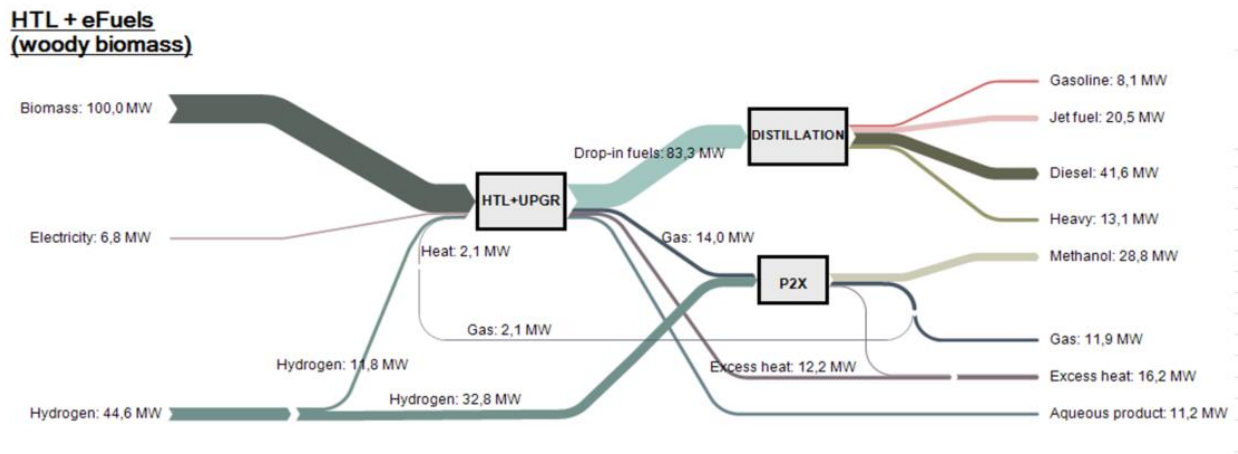
Kilde: Jesper Ahrenfeldt og Ulrik Birk Henriksen, DTU

I figuren er energiomsætningen angivet i øvre brændværdi. Målt i nedre brændværdi, omsætter anlægget 100 PJ træ/halm (nedre brændværdi) til 19 PJ syngas, 23 PJ-råolie og 40 PJ biochar. I disse tal er fratrukket et eget bidrag af gasproduktionen til at drive pyrolyseprocessen. Der er regnet med et CO₂-sink i biochar svarende til 90 Gt CO₂-eq per PJ biochar baseret på et kulstofindhold i biochar på 60% og en brændværdi på 22.3 GJ/t samt et forventet tab af 10% kulstof i løbet af de første 100 år.

11.2.5 HTL (HydroThermal liquefaction)

HTL kan omsætte både tør og våd biomasse til råolie. Processen kan også omsætte plastik, og er dermed god i situationer, hvor plastik og andre uønskede stoffer skal fjernes fra restproduktet, før det evt. føres tilbage til jorden. HTL kan producere både syngas og råolie, som efterfølgende kan kombineres med brint fra elektrolyse og opgraderes til grønne flydende brændsler i transporten, som vist i følgende oversigt. CO₂-biproduktet kan også sekvestreres og dermed opnå kulstof-negative brændsler.

Figur 18. Energiomsætning (nedre brændværdi) i et HTI-anlæg ved kombination af træ-biomasse og brint



Kilde: Eliana Maria Lozano Sanchez og Thomas Helmer Pedersen, Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet

11.2.6 Afbrænding

Afbrænding har typisk været brugt på affaldsforbrændingsanlæg til kraft/varme eller varme-produktion til fjernvarme samt med træ og halm i kraft/varmeværker og fjernvarmeværker. Af-brænding vil også være et alternativ fremover især til de typer af biomasse, som svært lader sig behandle i de andre anlæg. Afbrænding kan med fordel kombineres med Carbon Capture af CO₂-en i røggassen. Der vil også være industrielle processer, hvor fast biomasse eller grøn gas (biometan) brændes af til procesformål.

11.2.7 CC, CCU og CCS (Carbon Capture, Utilization and Storage)

CO₂ kan fanges ved kilden hvad enten denne er et biogasanlæg eller forbrænding eller industri-elle processer fra f.eks. cementproduktion. CO₂-en kan så enten deponeres (CCS) eller genan-vendes sammen med brint, hvorved der f.eks. kan produceres metan, metanol, diesel, JF eller andre grønne flydende brændsler.

I IDAs Klimasvar 2045 er biomasseressourcerne foreslået omsat til gasformige og flydende brændsler, som illustreret i sankey-diagrammet på næste side. Diagrammet viser også potenti-alet for CO₂-fangst ved de forskellige kilder.

Tabel 13. Opgørelse af carbon capture

Input	Mt CO ₂	Share	Mt CO ₂
Biogas	1,75	0,9	1,57
Industri	2,03	0,8	1,63
Affald k/v	1,32	0,8	1,06
Gas k/v	1,93	0,3	0,58
Cement	1,00	0,8	0,80
Sum	8,04		5,64

Opgørelsen viser, at der er et bruttopotentiale på ca. 8 Mt/år hvoraf 5-6 Mt/år vil kunne indfanges. Dette stemmer med andre estimater, der kommer frem til et fremtidigt dansk potentiale på 5-10 Mt/år.

11.3 Biomasse i IDAs Klimasvar 2045

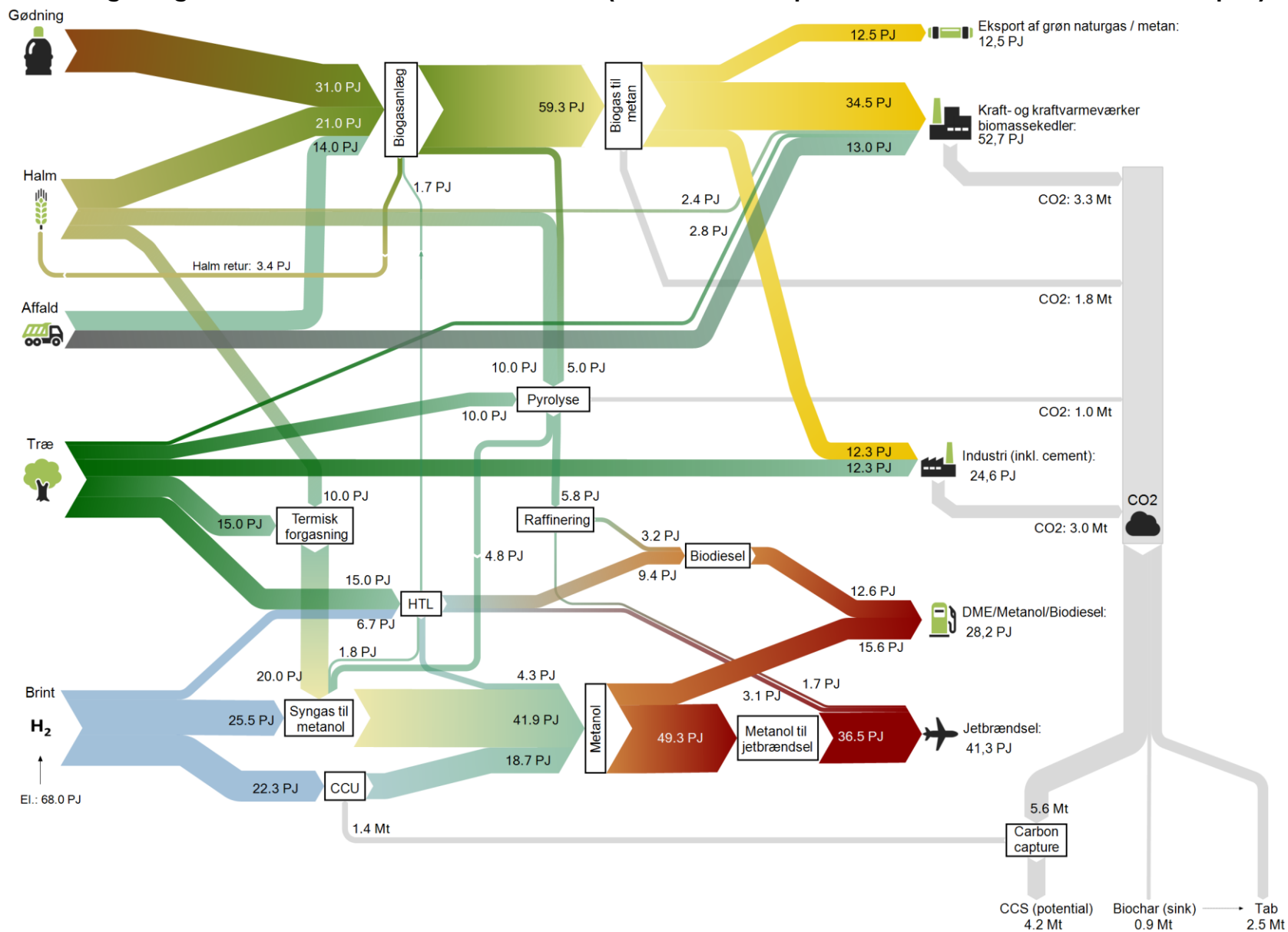
I figur 19 er nettoforbruget af biomasse 23 GJ/capita. I figur 20 er vist et alternativ, hvor biomasseforbruget er nedbragt til 117 PJ svarende til 20 GJ/capita. Som det ses, medfører det et mindre potentiale for sink med CCS og Biochar. Omsætningen i figur 19 er baseret på den nuværende landbrugssektor og driftsform, hvad angår dyrkning af marker og antal af dyrehold m.v. Ændringer heri kan betyde nedgang i mængden af biomassepotentialer til energiformål. Men som det ses af figur 20 kan forslaget også realiseres med et mindre input af biomasse. Konsekvensen er dog, at potentialet for CCS også bliver mindre.

Figur 19 og 20 omhandler biomasse med fokus på relation til dels anvendelse af brint og dels muligheder for CO₂-sink i form af CCS og Biochar. Udover det viste, er der også et mindre direkte brug af brint i transporten samt anvendelse af ammoniak til skibstransport.

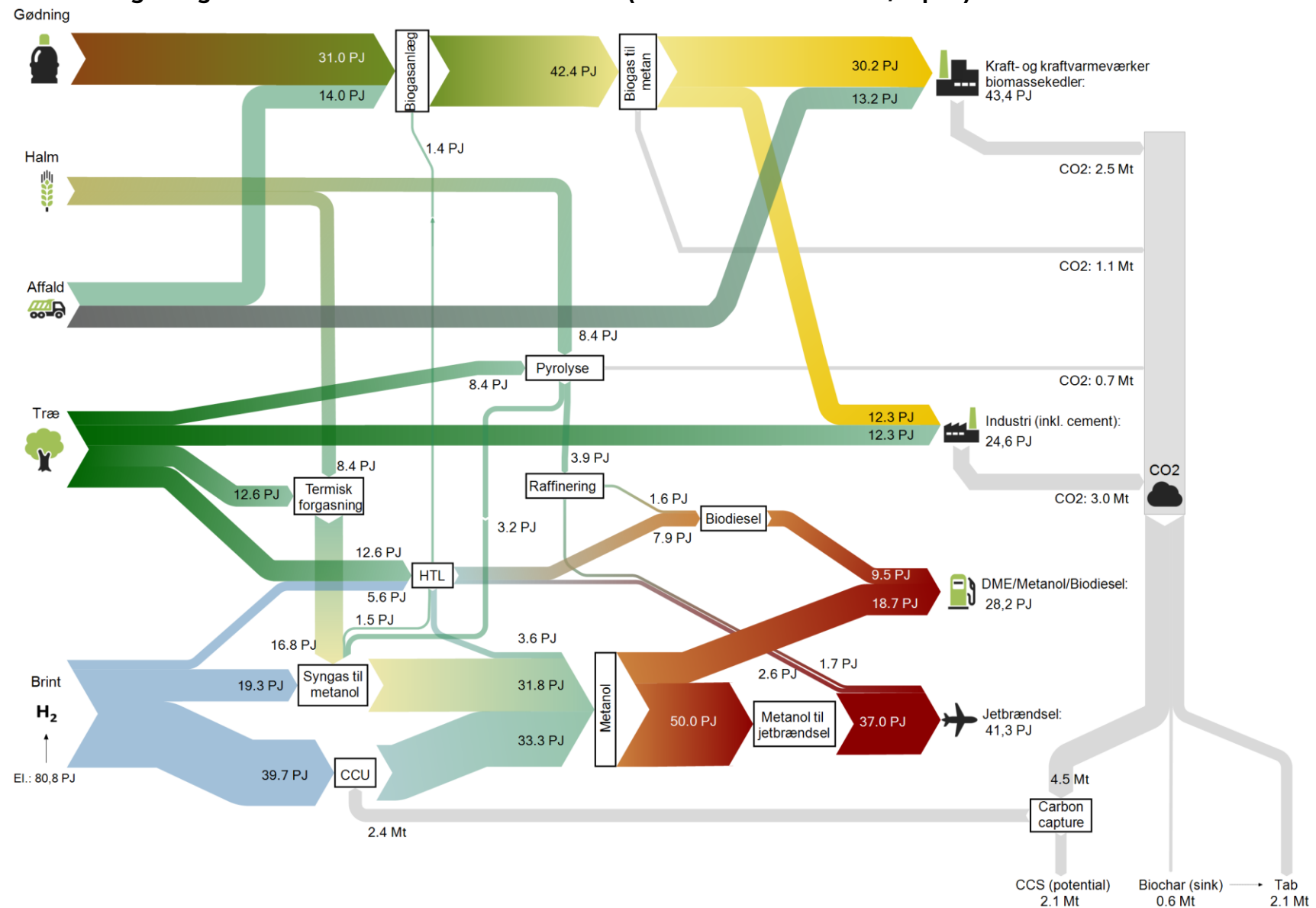
I IDAs Klimasvar 2045 er der konkret regnet på et biomasseforbrug og omsætning som vist i figur 19. Derved bidrager Danmark med 153 PJ-biomasse, hvoraf 140 PJ anvendes til at dække de danske energibehov inkl. Danmarks andel af internationale fly- og skibstransport, og resten eksporteres i form af biometan. Desuden tilvejebringes et potentiale for CCS og Biochar svarende til 4-5 Mt/år til at kompensere for fly contrails og de øvrige sektorer (industriprocesser, landbrug og arealanvendelse).

Det bør samtidig nævnes, at omsætningen i figur 19 i et vist omfang kan tilpasses den teknologiske udvikling af biomassekonverteringsteknologierne.

Figur 19. Oversigtsdiagram for anvendelse af biomasse i 2045 (153 PJ minus eksport 13 PJ = 140 PJ svarende til 23 GJ/capita)



Figur 20. Oversigtsdiagram for anvendelse af biomasse i 2045 (117 PJ svarende til 20 GJ/capita)



12 Vedvarende energi

Ud over biomassen skal der for at realisere IDAs Klimasvar investeres og udbygges med følgende vedvarende energiresourcer:

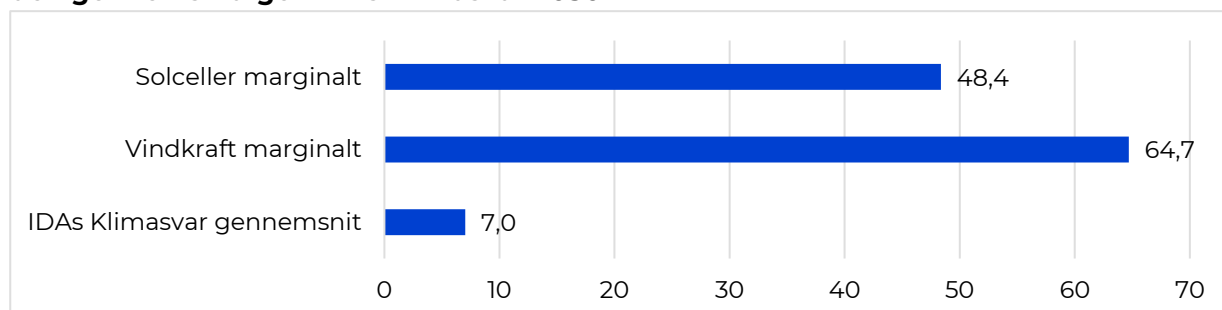
- Solvarme i fjernvarmen svarende til 6-7 PJ i 2030 stigende til 7-8 PJ i 2045.
- Solvarme i individuelle boliger til supplement af varmepumper svarende til 8-9 PJ både i 2030 og 2045.
- 500 MW geotermi med en fjernvarmeproduktion på 13-14 PJ og 1000 MW i 2045 svarende til 27 PJ/år.
- Solceller på store tage udbygges fra ca. 1.000 MW i 2020 til 5.000 MW i 2030 stigende til 10.000 MW i 2045.
- Vindkraft onshore udbygges fra ca. 4.200 MW i 2020 til mindst 4.800 i 2030 og 5.000 MW i 2045.
- Vindkraft offshore udbygges fra ca. 2.000 MW i 2020 til 6.630 i 2030 stigende til små 14.000 MW i 2045.
- Bølgekraft (132 MW) (dog med vind som alternativ) i både 2030 og 2045.

Som det fremgår, er der tale om en markant udbygning med især vind og sol. I IDAs Klimasvar er der regnet med en moderat udbygning med onshore vind. Det anbefales at undersøge mulighederne for en større andel af vindmøller på land, da dette vil reducere de samlede omkostninger til udbygning af vind.

Udbygningen er afstemt med dels elbehov og dels fleksibiliteten i systemet jf. afsnittet om sektorintegration. Således er el-ubalancen udtrykt i den tvungne eksport og i behovet for kraftværksproduktion eller import reduceret til 3,6 TWh ud af en elproduktion fra vind, sol og bølgekraft på i alt over 50 TWh - svarende til en ubalance på ca. 7 pct. af VE-produktionen.

Imidlertid er den marginale ubalance langt større. Hvis fx vindkraften øges marginalt, vil i størrelsesordenen 65 pct. gå direkte til tvungen eksport. For solceller er tallet lidt lavere. Her vil ca. 50 pct. gå til tvungen eksport. Se figur 21. Disse tal viser, at IDAs Klimasvar har den rigtige balance i udbygningen med vind og sol. Hvis mængderne øges yderligere, vil den største del af produktionen gå til tvungen eksport.

Figur 21. Den marginale ubalance ved mere vindkraft eller solceller sammenlignet med den gennemsnitlige i IDAs Klimasvar 2030



13 Teknologiske udfordringer

IDAs Klimasvar sætter fokus på dels at identificere de teknologier, som vil kunne opfylde 70 pct.'s målsætningen i 2030 på en samfundsøkonomisk god måde, og dels på hvilke nye teknologier, som vi får brug for frem mod målet om klimaneutralitet, også selvom de ikke nødvendigvis bidrager væsentligt i 2030.

Velkendte teknologier som er bærende for at opfylde 70 pct.'s målsætningen

- Opfyldelse af bygningsreglement for nye og eksisterende bygninger
- Energirenovering af eksisterende bygninger
- Udnyttelse af overskudsvarme fra industri
- Udbygning med fjernkøling med kølelagre samt anvendelse af grundvandskøling
- Udvidelse af fjernvarmeområder
- Erstatning af olie- og naturgasfyr med fjernvarme og individuelle varmepumper
- Onshore og offshore vindmøller
- Solceller primært opsat på store tage i industrien omkring store byer eller på parkeringspladser mv.
- Bevarelse af decentrale gasfyrede kraftvarmeværker samt opførelse af nye gasfyrede kraftvarmeværker
- Udbygning med biogas til industri og kraft- og kraftvarmeværker
- Biomasse; træ, affald, biogas mv. til kraftvarme og kraftværker og træflis, halm til fjernvarmekedler
- Solvarme til fjernvarme og individuel opvarmning
- Udbygning af den kollektive transport, cykelinfrastruktur, anvendelse af byplanlægning
- Udbredelse af elbiler og plug-in-hybridbiler, varebiler og busser på batteridrift eller plug-in hybrid, delvis elektrificering af tung transport (lastbiler, færger, strømkabler ved havne, elektrificering af motorcykler og små køretøjer samt specialkøretøjer)
- Intelligent integration af vind og sol i elnettet, herunder placering i det eksisterende elnet tæt på store eksisterende forbrugscentre og nye store forbrug, med henblik på at undgå unødigt udbygning af elnettet.

Delvist velkendte, delvist nye teknologier, som vi skal udvikle, som også får betydning i 2030

- Store varmepumper i fjernvarmen i samspil med industriel overskudsvarme, fjernkøling og omgivelsesvarme fra bl.a. drænvand og spildevand mv.
- Store sæsonvarmelagre, særligt i fjernvarmeforsyningen
- Geotermi
- Omlægning til 4. generations lavtemperatur fjernvarme
- Udnyttelse af overskudsvarme fra datacentre og elektrolyseanlæg til fjernvarme
- Intensiv energieffektivisering i industrien
- Erstatning af kul og olie med el og biomasse i industrien
- Elektrolyseanlæg med fleksibel drift i forhold til el fra vedvarende energikilder og elnetbelastning (fuldlasttid på cirka 50 pct.)

- Store brintlagre som anvendes fleksibelt i samspil med elektrolyseanlæg og elektrofuel-produktion
- Integrerede elektrofuel-produktioner med Carbon Capture anlæg, CO₂-lagre og kemisk syntese (DME, Metanol, Ammoniak)
- Fleksibel drift af eksisterende biomassefyrede kraftvarmeværker
- Roadpricing systemer med GPS, kontrolfunktioner og opkrævning
- Storskala intelligent opladning af elkøretøjer.

Nye teknologier vi skal udvikle nu, fordi vi skal bruge dem efter 2030

- E-roads til lastbiler med delvis batteridrift
- Mere effektive elektrolyseanlæg (SOEC)
- Videreudvikling af storskala elektrolyseanlæg og integrerede løsninger til elektrofuel-produktion, herunder carbon capture og kemisk syntese
- Storskala elektrolyse og elektrofuels inkl. Carbon Capture (vigtigt teknologi for både CCU og CCS)
- Storskala termisk forgasning af biomasse, pyrolyse og HTL samt evt. andre teknologier, der kan konvertere biomasse til gas eller flydende brændsler
- Storskala forsøg med halm i biogasanlæg
- Kraftig opskallering af elektrofuel-produktion til fly
- Bølgekraft (dog med vindmøller som alternativ)



Appendiks A: Forudsætninger for Økonomiberegning

Investeringsomkostninger, levetider og drift- og vedligeholdelse er baseret på Energistyrelsen og Energinets pt. nyeste Teknologikataloger (Energistyrelsen, 2020). Hvor der er forskel til forventningerne til omkostninger for den enkelte teknologi i 2030 sammenlignet med 2020 er generelt anvendt en gennemsnitsomkostning, idet investeringerne forventes fortaget jævnt i perioden mellem 2020-2030. På samme måde er der for IDA2045-scenariet anvendt en tilsvarende gennemsnitsomkostning for investeringer foretaget i perioden 2020-2045. I omkostningsopgørelsen er investeringsomkostninger omregnet til en årlig udgift baseret på en samfundsøkonomisk kalkulationsrente på 3 pct. Hvor omkostninger ikke foreligger i Teknologikatalogerne, eller hvor andre omkostninger er mere relevante, er det angivet under de enkelte afsnit.

Mht. brændselspriser er anvendt Energistyrelsens seneste fremskrivning fra "Samfunds-økonomiske beregningsforudsætninger 2019" fra oktober 2019 (Energistyrelsen, 2019d). Som udgangspunkt er brugt brændselspriser for 2030 for vurderingen af klimasvarende enkelte tiltag. Dog er der brugt 2020-priser for opgørelsen af de nuværende omkostninger, hvor der er sammenlignet med 2020. For 2045 er 2040 priser brugt, da denne fremskrivning kun går til 2040.

Tabel 14. Import/verdensmarkedspriser

[2019-EUR/GJ]	Kul	Brændselsolie	Diesel/gasolie	Petrol/JP	Ngas	Biomasse	Tør biomasse
2019	3,1	8,0	12,5	12,5	7,2	6,1	8,8
2030	2,9	10,4	15,0	14,9	6,6	6,6	8,8
2045	3,0	12,5	17,0	17,0	7,8	6,9	9,0

Biomasse er defineret som 50 pct. træflisimport og 50 pct. træflis af DK-producent. Tør Biomasse er sat ift. træpiller (industri).

Tabel 15. Håndteringsomkostninger

[2019-EUR/GJ]	An kraftværk	An værk	An forbruger
Kul	0,18		
Fuelolie	0,30		
Gasolie	0,30	1,18	3,30
Diesel			3,30
Benzin			3,76
JP1			0,30
Træflis	4,85	3,95	
Træpiller	0,30	0,91	4,27
Biomasse	3,66	3,95	6,45
Gas via net	0,27	0,86	2,19/1,61

Naturgas "handling costs" er ekskl. sunk cost således, at det så vidt muligt afspejler mulighederne for at spare, givet at der er investeret i gasnettet. For gas via net dækker første omkostning over håndtering til husholdninger og den efterfølgende for gas til transport.

Tabel 16. Anvendte investeringsomkostninger

Enhed	IDA2030		IDA2045		Note og kilde
Små kraftvarmeanheder	0,98	M€/MW	0,89	M€/MW	Gasmotorer [1]
Store kraftvarmeanheder	1,55	M€/MW	0,71	M€/MW	IDA2030: 40% single cycle og 60% biomasse IDA2045: 40% single cycle og 60% combined cycle [1]
Varmelager	3,00	M€/GWh	3,00	M€/GWh	[2]
Affaldsforbrænding	225,63	M€/TWh	217,19	M€/TWh	8000 fuldlasttimer [1]
Varmepumper i fjernvarme	2,38	M€/MW-e	2,19	M€/MW	Blanding af luft og søvands-varmekilder [1]
Kedler i fjernvarme	0,54	M€/MW	0,5	M€/MW	IDA2030: 80% biomasse, 20% gas. IDA2045 100% gas [1]
Elkedler i fjernvarme	0,15	M€/MW	0,14	M€/MW	[1]
Kraftværker	1,49	M€/MW	0,58	M€/MW	IDA2030: 40% single cycle og 60% biomasse IDA2045: 92% single cycle og 8% combined cycle [1]
Landvind	1,08	M€/MW	1,03	M€/MW	[1]
Havvind	2,03	M€/MW	1,9	M€/MW	[1]
Solceller	0,72	M€/MW	0,6	M€/MW	Mellemskala kommercielle systemer [1]
Bølgeenergi	4,88	M€/MW	2,91	M€/MW	[1]
Geotermi (varme)	291,67	M€/TWh	283,33	M€/TWh	6000 fuldlasttimer [1]
Solvarme	378,50	M€/TWh	352,72	M€/TWh	[1]
Sæsonvarmelager	0,56	M€/GWh	0,51	M€/GWh	[2]
Industriel overskudsvarme	30,00	M€/TWh	30,00	M€/TWh	[8]
Biogas	249,62	M€/TWh	234,06	M€/TWh	[7] inkluderer halm
Biomasseforgasning	2,05	M€/MW	1,58	M€/MW	[7]
Biogasopgradering	0,29	M€/MW	0,27	M€/MW	[7]
Carbon-capture	60	M€/Mt	60	M€/Mt	[5]
Elektrofuels fra CO ₂ -fangst	0,5	M€/MW	0,3	M€/MW	[5]
Elektrofuel fra biomasse forgasning	0,5	M€/MW	0,3	M€/MW	[5]
Jetfuel opgradering	0,37	M€/MW	0,37	M€/MW	[6]
Elektrolyse	0,6	M€/MW	0,6	M€/MW	Baseret på alkalisk elektrolyseomkostning i 2020 og SOEC-elektrolyse-omkostning i 2030 [7]
Brintlager	7,6	M€/GWh	29,7	M€/GWh	Miks af ståltanke og kaverner [2]. Grundet opdatering af datagrundlag siden IDA2030-udgivelse er IDA2045-omkostning højere
Gaslager	0,081	M€/GWh	0,081	M€/GWh	[8]
Ammoniakproduktion	0,87	M€/MW	1,26	M€/MW	Grundet opdatering af datagrundlag siden IDA2030-udgivelse er IDA2045-omkostning højere. IDA2030 fra [4]. IDA2045 fra [7]
Individuelle kedler	6,65	M€/1000 units	4,52	M€/1000 units	Biomassekedler [3]
Individuelle varmepumper	8,95	M€/1000 units	8,91	M€/1000 units	Luft til vand i eksisterende bygninger [3]. Grundet opdatering af data-grundlag siden IDA2030-udgivelse er levetiden forskellig i IDA2045
Individuelle solfangere	1533	M€/TWh	1533	M€/TWh	[8]

Energistyrelsen tager udgangspunkt i IEAs World Energy Outlook fra 2018 (International Energy Agency, 2018), hvor de bruger "New policies"-scenariet. IEA forventer en lavere kulpris i 2025 ift. 2017, men ca. den samme kulpris i 2040 som i 2017. Ved olie forventer IEA mere end en fordobling af olieprisen i 2040 ift. 2017, hvor den stiger mest fra 2017 til 2025 fra 61,3 kr./GJ til 103,1 kr./GJ (132,3 kr./GJ i 2040). IEA forventer, at naturgasprisen for Europa stiger ift. 2017, hvor Energistyrelsen forventer et fald i naturgasprisen i de kommende år (Energistyrelsen, 2019d)

De anvendte investeringsomkostninger listet for en række af de vigtigste investeringer i tabel 16.

Tabel 17 oplister levetider samt faste årlige drifts- og vedligeholdelsesomkostninger (D&V), hvor de samme kilder er gældende som ved investeringstabellen:

Tabel 17. Levetider og drifts- og vedligeholdelsesomkostninger

Enhed	Levetider [år]		Faste D&V [% af investering]	
	IDA2030	IDA2045	IDA2030	IDA2045
Små kraftvarmeenheder	25	25	0,98	1,03
Store kraftvarmeenheder	25	25	1,58	3,33
Varmelager	40	40	0,29	0,29
Affaldsforbrænding	25	25	2,38	2,34
Varmepumper i fjernvarme	25	25	0,34	0,52
Kedler i fjernvarme	25	25	4,73	3,7
Elkedler i fjernvarme	20	20	0,7	0,72
Kraftværker	25	25	1,64	3,35
Landvind	28	30	1,25	1,67
Havvind	28	30	1,87	2,51
Solceller	38	40	1,87	1,5
Bølgeenergi	22	26	1,93	2,64
Geotermi (varme)	28	30	1,49	1,36
Solvarme	30	30	0	0
Sæsonvarmelager	22	25	0,54	0,59
Industriel overskudsvarme	30	30	1	1
Biogas	20	20	13	13,42

Appendiks B: International fly- og skibstrafik

Formålet med dette appendiks er at lave et estimat over Danmarks andel af den internationale fly og skibsfart.

International flytransport

I de internationale opgørelser udregnes for hvert land det brændstofforbrug og den CO₂-emission, der knytter sig til alle fly, der starter i det pågældende land og frem til første destination. Tallet sammenholdes ofte med optankningen i det pågældende land, og der er typisk overensstemmelse mellem disse tal.

De tal, der findes i statistikkerne, opgør således, hvor meget der er tanket i det enkelte land, men ikke hvor meget det enkelte lands indbyggere har rejst. Hvis man regner for hele verden, er disse tal i sagens natur ens, og forbruget er ca. 2 GJ pr. indbygger pr. år (FN, 2015). Danskere må imidlertid forventes at have en højere andel end verdensgennemsnittet. I tabellen herunder er udregnet en række tal for forskellige geografiske områder.

Tabel 18. Håndteringsomkostninger

	Befolkning	Jet Petrol (tanket)		Per capita		DK-andel	CO ₂ -emission	Kilde
Geografi	Millioner	k ton	M liter	PJ	GJ/indb.	PJ/år	Mt/år	
Verden	7.600	300.000		15.938	2,1	12	1.148	[1]
Europa	741	50.000		2.656	3,6	20	191	[1]
Norden	27,3		4.540	170	6,2	35	12,2	[2]
Sverige	10,1		1.000	37	3,7	21	2,7	[2]
Danmark	5,6		1.200	45	8,0	45	3,2	[2]
Omsætningsfaktorer		704 kg/liter		37,4 GJ/liter		72 kg CO ₂ /GJ		

Kilde [1]: <https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/yearbook/2015/t20.pdf>

Kilde [2]: https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/FULLTEXT_Sustainable_Jet_Fuel_for_Aviation.pdf

Tabellen viser, at hvis danskerne rejser som verdensgennemsnittet, er Danmarks andel ca. 12 PJ/år, mens der i Danmark bliver tanket op for, hvad der svarer til 45 PJ/år (Wormslev *et al.*, 2016). Opgjort på den sidste måde er tallet for en svensker under det halve af, hvad det er for en dansker. Det er formodentligt et udtryk for, at både svenskere og danskere i stort omfang bruger Kastrup lufthavn som fælles udrejsested. Det danske tal er derfor formodentligt for højt, mens det svenske er for lavt. Et godt bud kunne være det nordiske gennemsnit, hvoraf den danske andel udgør 35 PJ/år.

En anden måde at anskue opgørelsen på, er at se på rejsetal for Kastrup lufthavn. Iflg. årsopgørelsen fra Kastrup for 2018 (Københavns Lufthavn, 2018) var 38 procent af de rejsende danskere, mens 62 pct. var fra udlandet. Under halvdelen af de rejsende er danskere og sydsvenskere. *"I dag er det udenlandske rejsende på besøg i Danmark og udenlandske transferpassager, der flyver via CPH, der fylder mest i terminalerne"* lyder det i opgørelsen. Ud fra disse tal kan man lave et estimat baseret på, at 38 pct. af forbruget er dansk for udrejsens vedkommende. Imidlertid skal de samme passagerer hjem igen, hvor flyet tankes i udlandet. Tallet bør derfor ganges

med 2. Tallet er for højt, hvad angår den del af danskerne, der rejser indenlands, for her tankes returflyet i Danmark. Til gengæld er det for lavt, hvis det medregnes, at danskere på lange rejser bruger yderligere mellemlandinger end Kastrup. Disse to forhold vægter i hver sin retning, men udligner ikke nødvendigvis hinanden. Med denne metode er et estimat at sige 2 gange 38 pct. af 45 PJ = 34 PJ.

Begge metoder peger således på et tal for det samlede flyarbejde for danskere på 34-35 PJ/år. Dette tal kan opdeles på indenlands 1,4 PJ/år (iflg. Statistikken) og international flytransport 33 PJ/år.

I andre studier har man forsøgt sig med andre opgørelsesmetoder. I (Teknologirådet, 2012) opgøres internationalt fly på samme måde som ovenfor med udgangspunkt i rejsestatistik fra Kastrup Lufthavn, idet international lufttransport *"er blevet reduceret med 35 pct. og 25 pct. (40 pct. af det totale er tilbage) for at tage forbehold for den del af transporten, der er relateret til henholdsvis udenlandske borgere og transit"*. Med denne opgørelsesmetode fremkommer et tal i størrelsesordenen 15-20 PJ.

I (Christensen, 2016) er lavet en opgørelse for 2010 baseret på en verdensomspændende billet-database, som viser antallet af billetter på hver enkelt rute fordelt på bl.a. nationaliteter. Desuden er der anvendt en database over flyruter og typen af fly på hver rute samt data for emissioner for hver flytype. Denne metode kommer frem til en CO₂-emission på 3,7 Mt/år i 2010, hvoraf de 2,7 Mt/år svarende til 37,5 PJ kan henføres til danske rejsende ud af Danmark. Resten er danskerne rejser videre ude i verden. Fremskrevet med en tilsvarende stigning, som udviklingen i Energistatistikens tal for udenrigsfart, svarer det for udrejserne til størrelsesordenen 45-50 PJ/år i 2020.

I (Olesen, 2015) er lavet en opgørelse baseret på forskellig statistik og antagelser om transport af gods og danske rejsende, som kommer frem til, at de *"samlede udledninger for danskeres og danske varers internationale flytransport skønnes derfor til at være i alt mindst 30 pct. større end udledninger fra brug af flybrændstof solgt i Danmark til internationale flyvninger"*. Dette svarer til et tal i størrelsesordenen 50-55 PJ.

Konklusion: Her er der valgt at anvende Energistatistikens tal for udenrigsluftfart, som i seneste opgørelse for 2018 var 42,9 PJ og (før Corona-krisen) i Energistyrelsens Basisfremskrivning 2019 (Energistyrelsen, 2019b) var forventet 41,6 PJ i 2020 stigende til 44,1 PJ i 2030. Tallet har den fordel, at det opgøres og indmeldes i FN-systemet, og når alle landes tilsvarende opgørelser lægges sammen, fås det fulde billede. Efter alt at dømme er tallet også i den rigtige størrelsesorden. Dog tyder de mere detaljerede undersøgelser på, at det reelle tal for danske rejsenes brændselsforbrug, er højere end energistatistikens opgørelse.

International skibstransport

Brændselsforbrug og CO₂-emissioner for skibsfart opgøres efter samme princip som for fly. CO₂-udledningen fra danske skibe, der sejler i international fart – dvs. mellem havne i to forskellige lande – tæller således ikke med i de danske opgørelser. De danske opgørelser bygger på brændstofsalg i Danmark til skibe, der sejler mellem to danske havne (national søfart), og skibe, der

sejler fra en dansk havn til en udenlandsk havn (international søfart). International skibsfart reguleres af FN's internationale søfartsorganisation, IMO. Hvert femte år udgiver IMO et 'Greenhouse Gas Study', der opgør udledningerne af CO₂ og andre drivhusgasser fra international skibsfart.

I den seneste rapport fra 2014 (International Maritime Organization (IMO), 2014) er emissionerne fra den globale skibstransport opgjort til 796 millioner ton i 2012. Næste opgørelse er planlagt til at udkomme i efteråret 2020 og indeholder også scenarier for udledningen frem mod 2050. Fordelt efter befolkning svarer Danmarks andel til ca. 8 PJ/år. Samme år blev der i Danmark tanket ca. 21,7 PJ til skibe i udenrigsfart. I (Olesen, 2015) er der lavet estimat baseret på vareimport og skøn over fragtlængder, der kommer til et tal i størrelsesordenen 5 Mt CO₂ pr. år, hvor de 33 PJ kun svarer til ca. det halve.

Konklusion: Her er der valgt at anvende Energistatistikens tal for udenrigsbunkring, som i seneste opgørelse for 2018 var 24,9 PJ. Tallet har den fordel, 1) at det er opgjort på samme måde som for international luftfart, 2) at det opgøres og indmeldes i FN-systemet, og 3) når alle landes tilsvarende opgørelser lægges sammen fås det fulde billede.

Referencer

1. Brynolf, S. et al. (2018): 'Electrofuels for the transport sector: A review of production costs', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 81, pp. 1887–1905. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.288.
2. Christensen, L. (2016): 'Environmental Impact of Long Distance Travel', *Transportation Research Procedia*, 14, pp. 850–859. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.033.
3. Danish Energy Agency & Cowi (2013): *Alternative drivmidler*.
4. Dyrelund, A. et al. (2008): *Varmeplan Danmark*.
5. EA Energianalyse (2018): *Samfundsøkonomisk værdi af varmebesparelser*.
6. Energistyrelsen (2019a): *Analyseforudsætninger til energinet*.
7. Energistyrelsen (2019b): *Basisfremskrivning 2019*. Available at: <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/bf19.pdf>.
8. Energistyrelsen (2019c): *Fremskrivning af olie og gas*. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/b12_oliegas.pdf.
9. Energistyrelsen (2019d): *Samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger for energipriser og emissioner*.
10. Energistyrelsen (2020): *Teknologikataloger*. Available at: <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/teknologikataloger>.
11. FN (2015): *Production, trade and supply of jet fuels*. doi: 10.18356/bf40f6d8-en.
12. Hamelin, L. & M. Borzęcka & M. Kozak & R. Pudelko (2019): *A spatial approach to bioeconomy: Quantifying the residual biomass potential in the EU-27*, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 100 (2019) 127–142. doi:10.1016/j.rser.2018.10.017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307214>
13. International Energy Agency (2018): *World Energy Outlook*. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
14. International Maritime Organization (IMO) (2014): *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*, *International Maritime Organization (IMO)*. doi: 10.1007/s10584-013-0912-3.
15. Københavns Lufthavn (2018): 'Årsrapport'. Available at: <https://www.cph.dk/om-cph/investorer/trafikstatistik/2019/1/rekord-i-cph-303-millioner-rejsende-i-2018>.
16. Kromann, M. & H. Kragerup & M. Dalsgaard (2015): *ENERGISPAREPOTENTIAL*.
17. Lund, H. & B. V. Mathiesen (2006): *IDAs Energy Plan 2030*. Danish Society of Engineers. IDA. Copenhagen.

18. Lund, Henrik. *et al.* (2014): '4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems.', *Energy*, 68. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
19. Lund, Henrik *et al.* (2014): 'Heat Saving Strategies in Sustainable Smart Energy Systems', *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 04, pp. 3–16. doi: 10.5278/ijsepm.2014.4.2.
20. Lund, H. *et al.* (2018): 'The status of 4th generation district heating: Research and results', *Energy*, 164, pp. 147–159. doi: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
21. Lund, Henrik & Jakob Zinck Thellufsen (2019): EnergyPLAN Advanced Energy Systems Analysis Computer Model Documentation Version 15", Sustainable Energy Planning Research Group, Aalborg University, Denmark, September 2019. Published online at www.EnergyPLAN.eu. <https://www.energyplan.eu/wp-content/uploads/2019/09/EnergyPLAN-Documentation-Version15.pdf>
22. Mathiesen, B. *et al.* (2014): *CEESA 100% renewable energy transport scenarios towards 2050: coherent energy and environmental system analysis: technical background report part 2*. Available at: [https://vbn.aau.dk/da/publications/ceesa-100-renewable-energy-transport-scenarios-towards-2050\(8f59ea50-514a-4a6c-aaf8-ddc949612129\).html](https://vbn.aau.dk/da/publications/ceesa-100-renewable-energy-transport-scenarios-towards-2050(8f59ea50-514a-4a6c-aaf8-ddc949612129).html).
23. Mathiesen, B. V. *et al.* (2015): *IDA's Energy Vision 2050. A Smart Energy System strategy for 100% renewable Denmark*. Aalborg.
24. Mathiesen, B. V. *et al.* (2016): *FUTURE GREEN BUILDINGS A KEY TO COST-EFFECTIVE SUSTAINABLE ENERGY SYSTEMS*. Copenhagen.
25. Mathiesen, B. V. *et al.* (2017): *The role of Photovoltaics towards 100 % Renewable energy systems*.
26. Mathiesen, B. V. & H. Lund & K. Karlsson (2009): *IDA´s Climate Plan 2050*. Danish Society of Engineers. IDA. Copenhagen.
27. Olesen, Gunnar Boye (2015): *Drivhuseffekter fra (dansk) international transport*. Available at: https://ve.dk/wp-content/uploads/2013/01/energivision_2014_international-dansk-transport.pdf.
28. SDU & COWI. (2014): *Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system*. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/carbon_footprint_of_bioenergy_pathways_for_the_future_danish_energy_system_-_final_210314_l.pdf.
29. Thomsen, Michael Lundgaard, formand A. P. (2020): *Regeringens Klimapartnerskaber. Partnerskab for Energitung Industri. AFRAPPORTERING, 13. MARTS 2020*.
30. Teknologirådet (2012): *Dansk transport uden kul og olie - hvordan?*, *Research Report*. Available at: papers://ef64220a-a077-48ec-ae81-be13b32d2073/Paper/p1037.
31. Trængselskommissionen (2013): *Afrapportering om landsdækkende roadpricing Arbejdsgruppen*.

32. Wormslev, Erik C. & Jakob Louis Pedersen, et al. (2016): *Sustainable Jet Fuel for Aviation*. doi: <http://dx.doi.org/10.6027/TN2016-538>.
33. Danish Energy Agency (2020) *Biomass Analysis*. Copenhagen.
34. Nord-Larsen, Thomas; Johannsen, Vivian Kvist; Riis-Nielsen, Torben; Thomsen, Iben Margrete; Jørgensen, B. B. (2020) *Skovstatistik 2018 Forest statistics 2018*. Frederiksberg.
35. TræTilEnergi (2020) *FREMTIDEN FOR DANSK SKOVFLIS MOD 2050 - Analyse og Anbefaling*. Available at: https://www.skovforeningen.dk/wp-content/uploads/2020/05/TTE_fremtiden-dansk-skovflis-mod-2050.pdf.

IDAs Klimasvar 2045 – Sådan bliver vi klimaneutrale

Danmark kan opfylde regeringens målsætning om 70 pct. CO₂-reduktion i 2030 og være klimaneutralt allerede i 2045 på energi og transportområdet. IDAs Klimasvar 2045 giver konkrete bud på, hvordan det rent teknisk kan gøres på en samfundsøkonomisk god måde. Hvis vi gør det rigtigt, bliver det ikke dyrt for samfundet. Tværtimod vil vi kunne bruge den grønne omstilling til at skabe arbejdspladser og industriel udvikling.

Rapporten løfter blikket fra 2030-målsætningen og sætter fokus på, hvordan Danmark på den lange bane kan blive klimaneutralt. Dermed sætter vi 2030-målsætningen i perspektiv, og rapporten kommer med en række anbefalinger til, hvad der er vigtigt at tage med i overvejelserne allerede nu.

Danmarks målsætning for 2030 er opstillet i henhold til FN's måde at regne på. Det betyder, at ikke hele Danmarks klimabelastning er med i regnestykket. Men det bør det være på den lange bane. Med rapportens forslag for 2045 bliver Danmark klimaneutralt også hvad angår den danske andel af internationale fly og skibstransport, inden for rammerne af en bæredygtig anvendelse af biomasse.

Blandt de vigtige budskaber i rapporten er, at biomassens rolle i den danske energiforsyning skal forandres. IDAs Klimasvar 2045 peger på, hvordan Danmark ikke skal afvikle biomasses rolle, men derimod udvikle den. Danmark får brug for biomassen for at kunne blive klimaneutrale på den lange bane. Vi kan og skal gøre os mindre afhængige af afbrænding og import af træ samtidigt med at vi udvikler teknologier, der kan give os nye typer af grønne brændsler fra power-to-x.

Det er i det hele taget afgørende, at vi intensiverer i udvikling af nye teknologier for, at Danmark senest i 2045 kan være et klimaneutralt samfund. Rapporten identificerer de teknologier, som vi ikke har til rådighed nu, men som vi får brug for efter 2030. Det er afgørende, at vi allerede nu sætter gang i forskning, udvikling, test og demonstration af de teknologier, der skal bringe os hele vejen til klimaneutralitet i 2045.



AALBORG UNIVERSITET

